

出國報告（出國類別：實習）

赴丹麥奧爾堡大學實習之出國報告

服務機關： 核能研究所
姓名職稱： 陳銘宏 助理研究員
派赴國家/地區： 丹麥奧爾堡
出國期間： 108年5月10日~108年5月24日
報告日期： 108年5月28日

摘要

本次公差前往歐洲丹麥奧爾堡大學土木工程系之 John Dalsgaard Sørensen 教授實驗室，主要目的為學習包括風能評估與微觀選址等相關技術。期間為 108 年 5 月 10 日 ~ 108 年 5 月 24 日，共 15 天。實習期間也將台灣與核研所發展之風能相關計畫與技術向 Sørensen 與系上同仁及學生展示並進行技術交流，增進彼此瞭解。實習期間也藉由學習到的技術進行實際風能評估之案例分析，所計算之結果將有助於本所開發併網風場計畫之進行。

綜合此次公差之成果與心得，提出以下幾項建議：(1)丹麥有豐富的天然資源，約有 50%的電力是來自風力發電，而從 2007 年至 2017 年期間，風力的發電總量從 7 GWh 提升至 14 GWh，另亦設立目標在 2020 年由離岸風電提供全國 40%之電力(我國為 2025 年 20%)，因此丹麥在發展離岸風機之經驗對於我國目前正積極發展之 2025 年 5.5 GW 之離岸風電目標將有重大助益，應持續與其進行交流，協助我國達成離岸風電之裝置目標；(2)奧爾堡大學土木系在風機相關領域具有領先地位，包括可靠度分析與結構健康監測等項目，本所應持續與其交流，以加強本所與我國在風機領域之發展。

目 次

摘 要

(頁碼)

一、目 的	1
二、過 程	2
三、心 得	9
四、建 議 事 項	47
五、參 考 資 料	49
六、附 錄	52

一、目的

國內目前配合政府再生能源發展的政策規劃，經濟部於 101 年 7 月通過風力發電離岸系統示範獎勵辦法。此外，科技部為配合國內離岸風機的設置亦透過能源國家型計畫，推動離岸風力主軸計畫，整合各界之科技研發資源，以協助相關技術的建立，以期能夠順利推動風力發電政策，其中主要是 2025 之 20% 再生能源與 5.5 GW 之離岸風機裝置容量之政策目標。

核能研究所之風機分組過去的風機研發主要以中小風機技術建立為主，經歷 400W、25 kW 及 150 kW 的中小型風機研製，是目前國內唯一具有完整之設計與系統整合技術能力的國家級實驗室。而另外大型與離岸風機亦開始著手就國際規範 IEC 與 GL 於本土化環境之適用性評估之工作，並嘗試由分析結果建立適用於本土化環境之設計驗證程序。

108 年起承接前瞻基礎建設計畫，進行併網風機系統建置與預報技術開發等工作，其中包括風能評估、微觀選址與風場規劃等作業供風場建置所需之參考。因此，為精進風能評估、微觀選址與風場規劃等開發中之技術，本次公差前往歐洲丹麥奧爾堡大學，向土木工程系之 John Dalsgaard Sørensen 教授學習風能評估等技術(正式邀請函如附錄一)。

實習期間也將台灣與核研所發展之風能相關計畫與技術向 Sørensen 與系上同仁及學生展示並進行技術交流(附錄二、附錄三)，增進彼此瞭解，同時也建立聯絡管道，後續希望有進一步之合作。

二、過 程

此次公差從 108 年 5 月 10 日 ~ 108 年 5 月 24 日，共 15 天。主要是前往歐洲丹麥奧爾堡大學，向土木工程系之 John Dalsgaard Sørensen 教授學習風能評估等技術，相關行程規劃如表 1。

表 1、公差行程表

日期	行程
5/10	去程
5/11 ~ 5/23	風能技術實習
5/24	回程

丹麥位於德國與挪威之間，是屬於海島型國家(圖 1)。奧爾堡位於丹麥的西北區域，如圖 2 所示。而奧爾堡大學包括土木工程系等大部份的系所位於奧爾堡市區的東南方，如圖 3 所示，另有少部份的系所包括附設醫院則是位於市區。

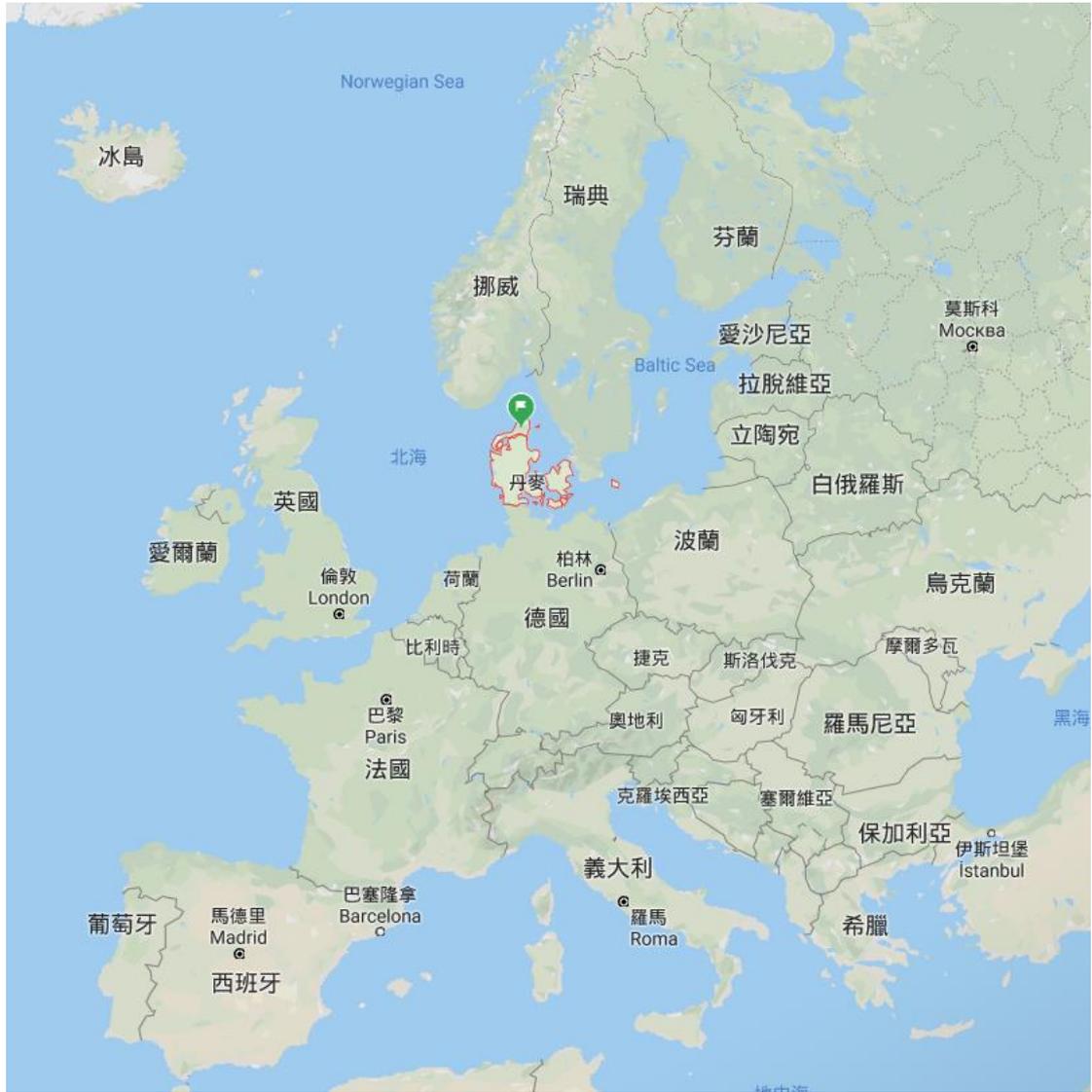


圖 1、丹麥地理位置

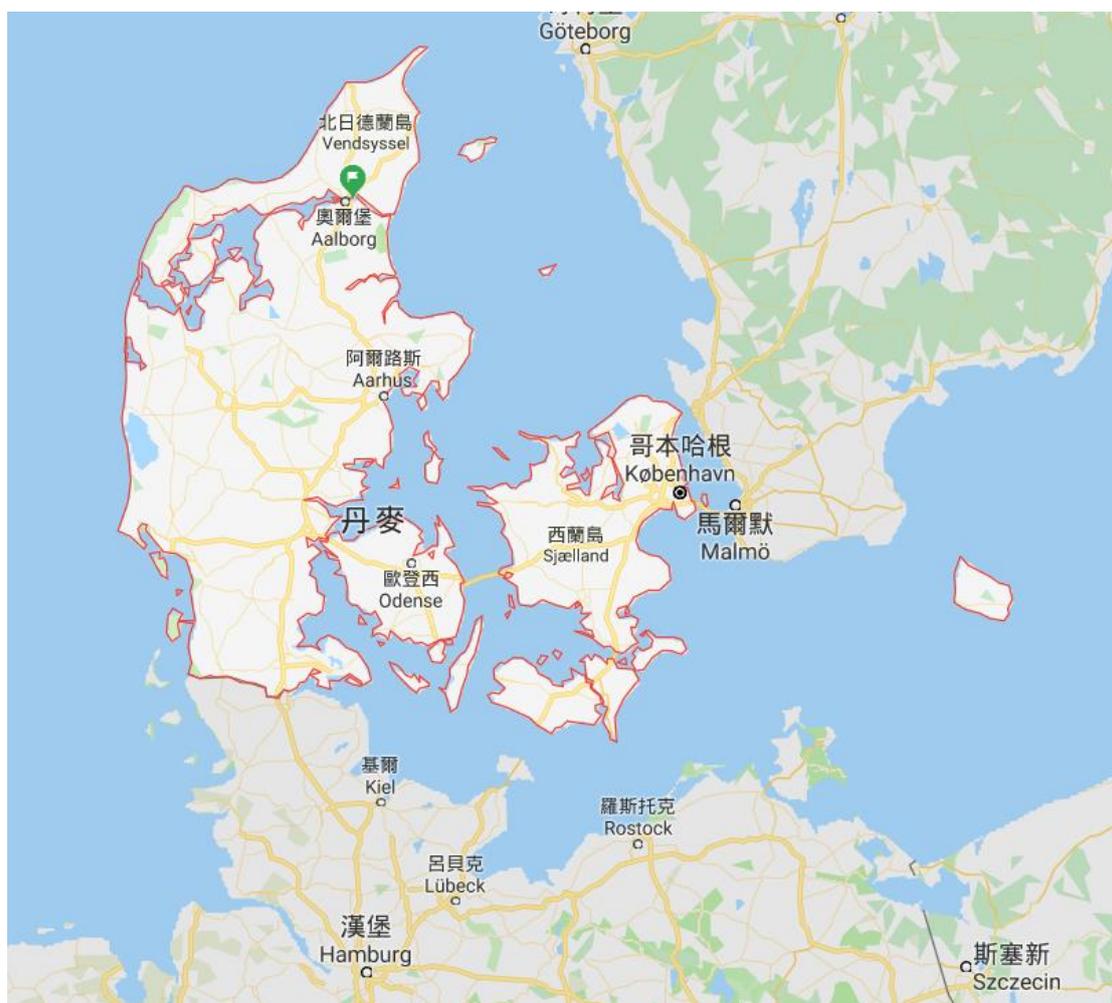


圖 2、丹麥-奧爾堡地理位置

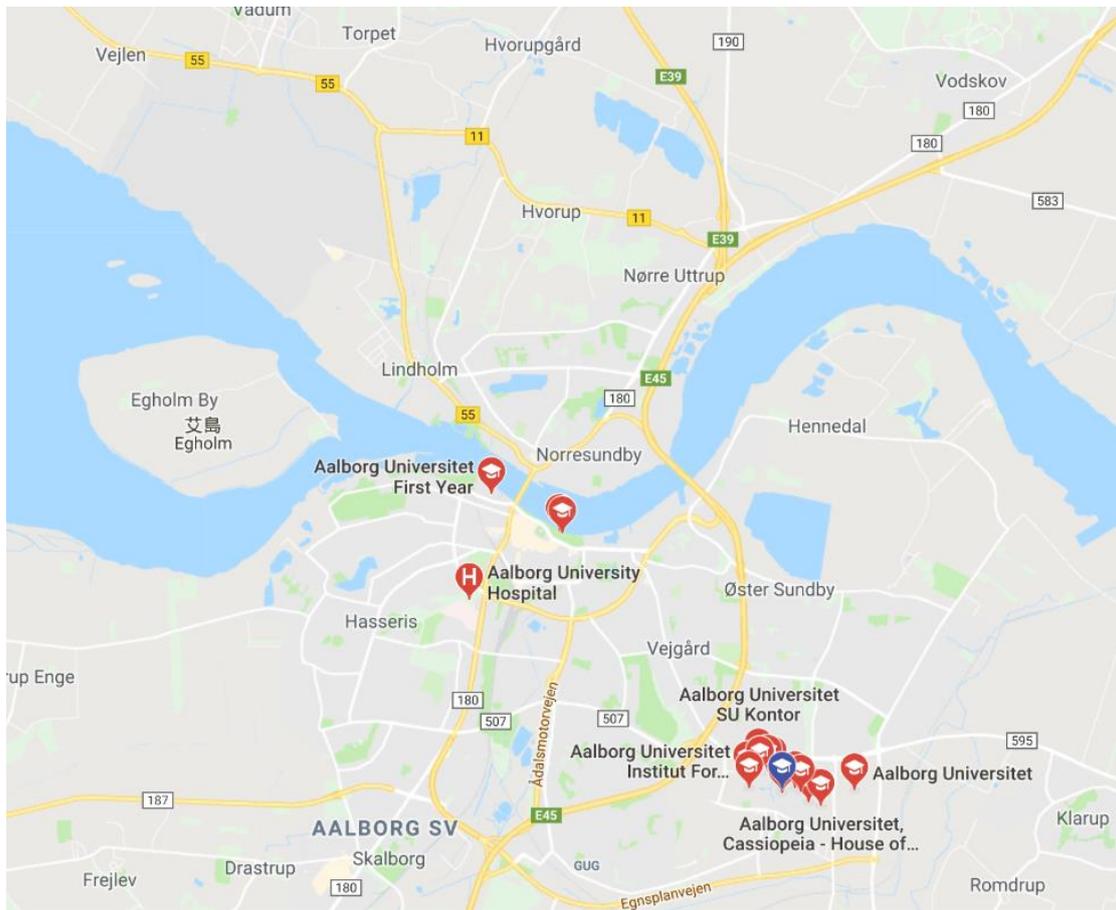


圖 3、奧爾堡大學地理位置

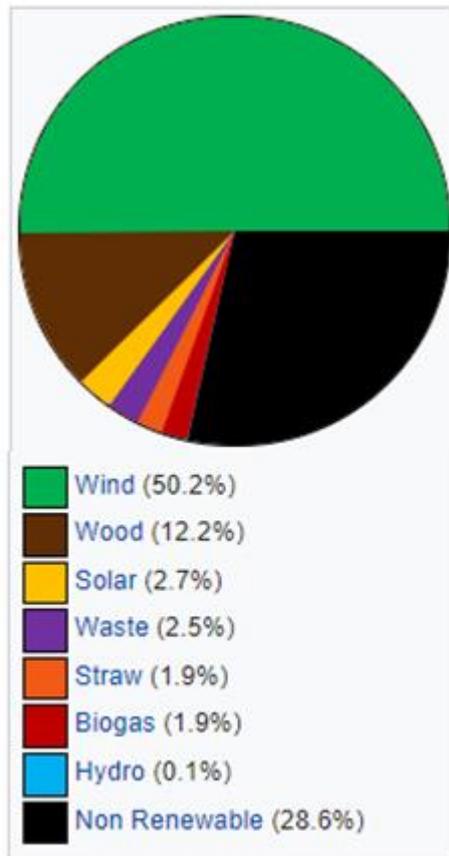


圖 4、丹麥電力結構組成圖[1]

丹麥之電力來源約有 70%以上是來自再生能源，其中最主要是風力發電，如圖 4 所示。而就風力發電而言，從 2007 年至 2017 年之風力發電量持續穩定成長，其中陸域之成長較緩，主要的風電成長來自於離岸風場的開發(圖 5)。

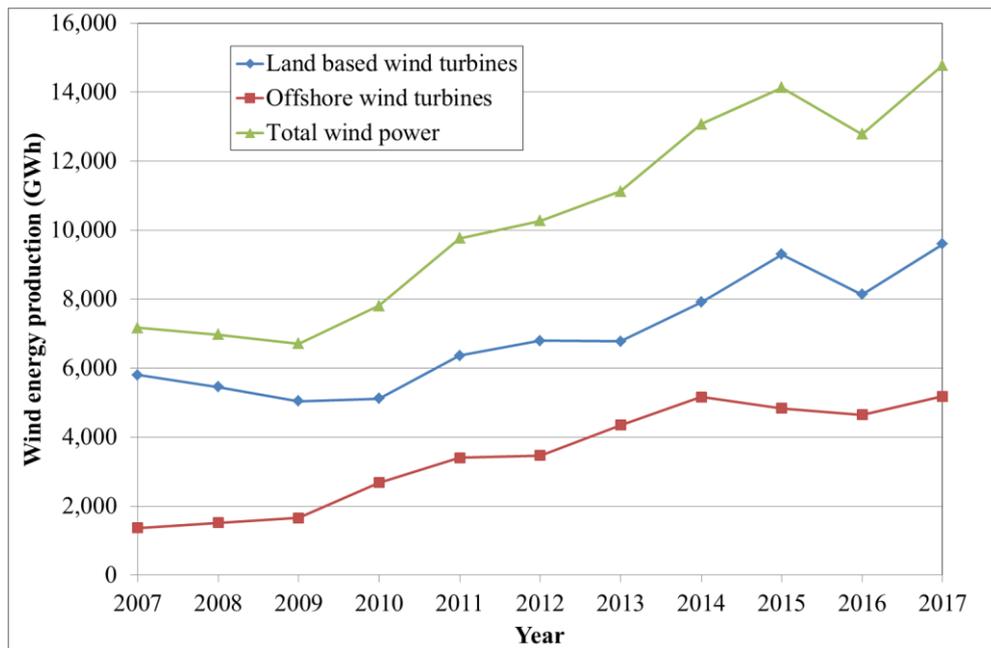


圖 5、丹麥風力發電變化圖[1]

John Dalsgaard Sørensen 教授投入風能領域之研究將近 40 年，有超過 500 篇以上的論文發表，除為歐洲風能協會(The European Wind Energy Association, EWEA)之會員，並擔任 IEC 61400-1 ed. 4 技術標準訂定的主要技術委員之一，是風能領域非常著名之學者(圖 6、圖 7)。Sørensen 教授之專長包括風能評估、風場布建、可靠度分析與結構分析等多項領域。本次實習主要是學習風能評估與風場規劃等議題。



John Dalsgaard Sørensen

M.Sc., Lic.techn., B.Com.
Department of Civil Engineering
The Faculty of Engineering and Science
Division for Structures, Materials and Geotechnics
Reliability and Risk Analysis Research Group
Danish Centre for Risk and Safety Management

[View Scopus Profile](#)

Phone: 9940 8581, 2077 5805
Email: jds@civil.aau.dk

Thomas Manns Vej 23, 1-320
9220 Aalborg Ø
Denmark

圖 6、John Dalsgaard Sørensen 教授簡歷

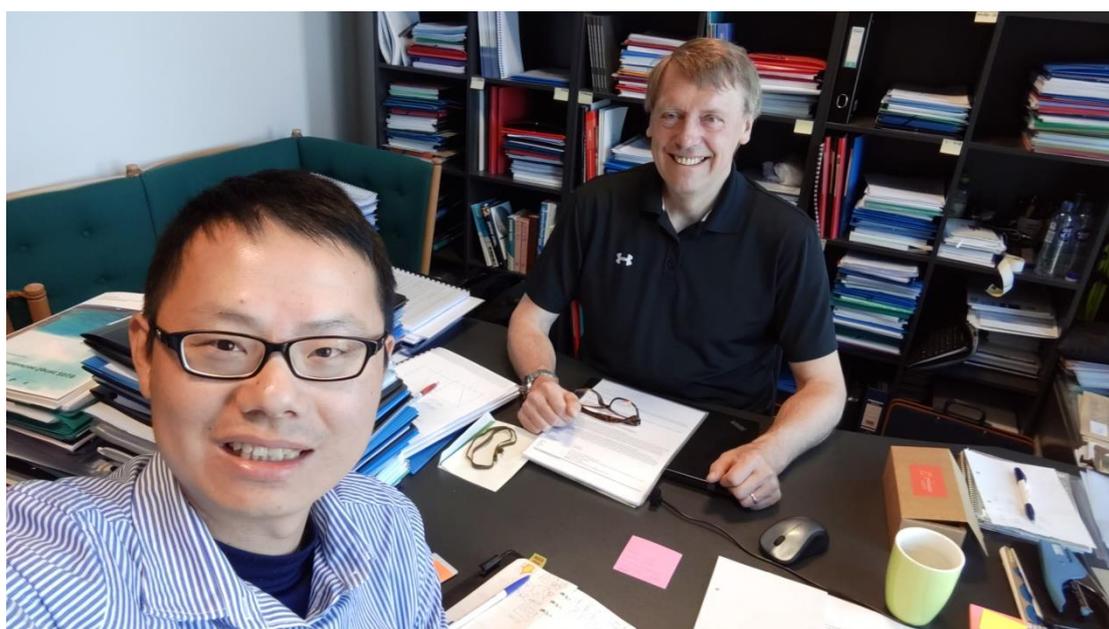


圖 7、於 John Dalsgaard Sørensen 教授之辦公室合照

三、心得

此次公差主要是前往歐洲丹麥奧爾堡大學，向土木工程系之 John Dalsgaard Sørensen 教授學習風能評估等技術。在丹麥奧爾堡期間，除了展示我國之風能計畫與核研所建立之風能技術外，主要是研讀 1 份風能評估與分析之報告[2]與數篇相關之國際期刊與研討會論文，從中學習風能評估與風機系統相關之知識，以利後續本所進行之計畫工作。以下將簡要說明風能評估技術之主要內容。

一、風能評估基本介紹

由於傳統化石能源可能耗盡，加上空污等環保議題，使得人類開始著手開發較潔淨之可再生能源，其中主要是以風力及太陽能為主。在獲取風能的過程，風資源評估(wind resources assessment)是極為重要的前置作業。除工程技術面的考量外，建置風場最主要需考量的因素即為獲利能力與可能面臨的風險，這些都需要完整的風資源評估的進行來進一步做出風場是否值得開發之評斷。

近年來，風機的發展往大型化進行，因此風機本體將會接觸更複雜的環境條件。過往採用的簡易工程分析方法已不再適用。當風機安裝於複雜地形環境或是海上環境時，風資源評估已成為一門獨立學科，須於正式開發風場之前進行完整與綜合性的風資源評估，搭配商業模式之分析，以完整規劃與決定風場之內容與適合開發與否等重大決定。

風資源層級

全球尺度：

大氣層因受太陽照射的熱能，成為推動全球尺度的氣流流動之驅動力。因為地球是傾斜的，且表面並不平整，所以接受到的熱力有所差異，導致空氣在空間上於不同區域形成循環，在時間上從 1 年到數年等尺度之變化，這也是導致風資源在全球的分布不均 (圖 8)。

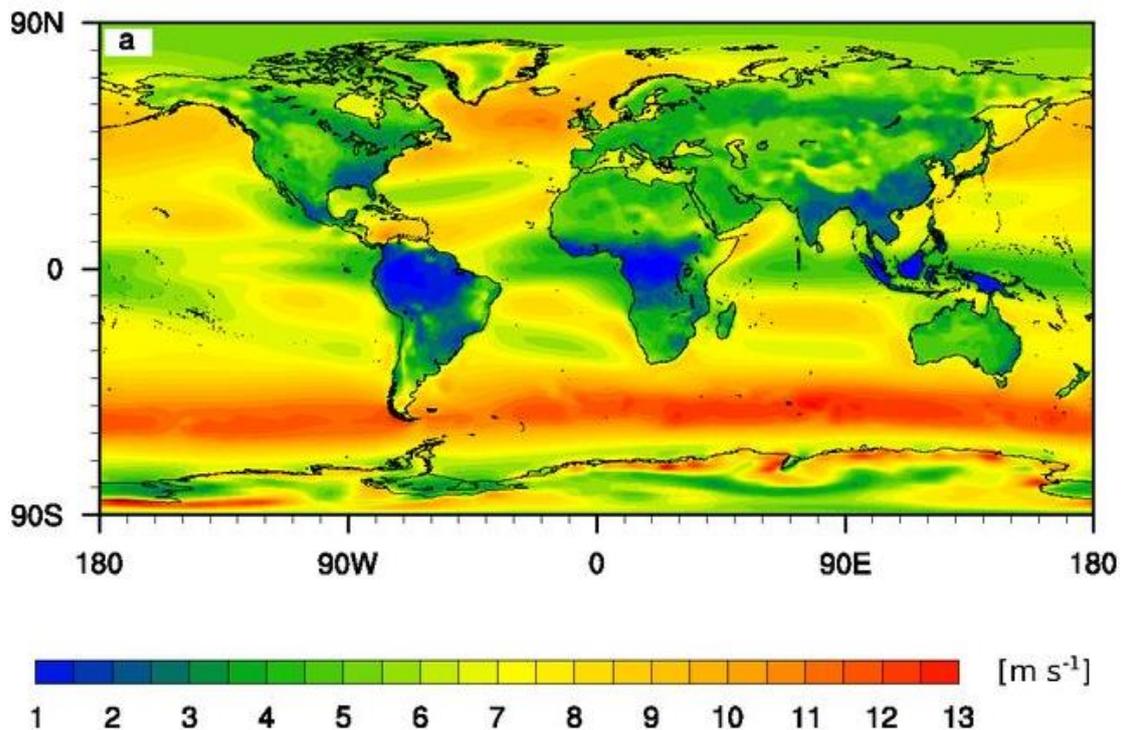


圖 8、全球風速分布圖[3]

全球尺度可以大概看出不同區域的風能強度，但對於風場專案計畫的評估而言，其尺度過大，需要搭配小尺度的分析，並與全球尺度的數據做為邊界條件進行進一步的分析。

概略尺度(synoptic scale)：

概略尺度的級別是一般人較熟悉的氣象預報所採用，包括鋒面、氣壓、熱帶氣旋等之分析，空間尺度約在 200 公里到 1000 公里之間，時間從數天到數月不等。

中尺度(meso-scale)：

中尺度是介於大型的全球尺度與小尺度之間，但由於全球尺度在近年因為計算資源的精進而改良，使其與中尺度之間變得較無分別，近年來中尺度的模型主要用於大範圍的選址之用，其解析度優於大尺度的模型，可初步選出適合建立風場的區域後，再進一步以小尺度的模型進行分析。

小型區部尺度(local scale)

一般稱之為微觀尺度或是微觀選址(micro-siting)。這層級的模型需考量更細的地形效應與建物對流場之影響，地形變化、粗糙度，甚至熱效應都需考量。

大尺度的分析需要長期的觀測資料，而小尺度的分析最少只需要 1 年期間的氣象資料即可進行分析。為了精確的進行分析，需要在欲開發風場的區域裝設氣象觀測設備，以量測分析所需要的風速、風向等資料，進行統計分析後，才能進行計算，且量測設備的高度盡可能與風機的高度一致最佳。而近年來對於不容易設置量測設備的區域(例如離岸風場)，可用光達(Lidar)或聲達(Sodar)進行量測。

風資源的不確定性：

由於風是一直在變化的資源，且風速與風能是有 3 次方的關係，因此風速的變化很大時，會使得風資源的盤點更加困難，結果的不確定性也更大。以長期平均(數十年)之風速判斷可能是 IEC II 級之風場，在某些年度的風速可能會著落到 IEC I 或 IEC III 的等級，這樣的偏差會導致過於保守或是風機負載過大的風險而減損其使用壽命。因此會搭配所謂的量測-關聯-預測(Measure-Correlate-Predict, MCP)模式來進行，以降低分析的不確定性。

二、數值方法與模型

雖然有一些比較簡單的評估方式可以簡要的獲得某地區的風能概況，但還是需要比較能夠計算複雜現象的數值模型以提供更準確與定量的結果，做為工程與商業模式做判斷。一般而言，想要在每一個具有潛力的地方，在可能的風機高度裝設量測設備是不切實際的，實際上是利用 1 到 2 座的測風設備來外推出整個特定風場在不同高度的風能密度。因此如何能在不同位置與不同高度，利用即有的 1~2 個測站的資料進行計算與合理的外推，即是本節數值方法的重點。

線性化數值流場模型(Linearized numerical flow models)

一般在計算流場採用的 Navier-Stokes 方程式具有高度的非線性，很少能夠求得解析解，因此在風場分析部份，會先將其線性化，以簡化整個模型的複雜度。

Jackson-Hung 模型

此模型是由 Jackson 與 Hunt 於 1975 年提出[4]，是將 Navier-Stokes 線性化之後所得到，用於描述 2 維尺度的紊流空氣流場流經低高度的山丘。目前最廣為使用的另一套模型 WAsP 也是基於 Jackson-Hung 之模型所建立。

WAsP 模型

全名為 Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP)[5]，是由丹麥之 Risø 國家實驗室基於 Jackson-Hung 之模型理論所開發，又稱做歐洲風能地圖法。因其已被廣泛地使用與驗證，目前在工程上與商業決策上 WAsP 是一套已可被大部份人接受之分析工具。其它著名的商用軟體包括 WindPRO 與 WindFarmer 則設計成可直接使用 WAsP 計算後之結果做進一步的分析。WAsP 模型的方法論如圖 9 所示。

WAsP 模型雖是著名且被大部份接受的工具，但在使用上還是有一些限制，例如：

- 1、須使用相同中尺度的氣象資料
- 2、應避免使用不規則變化之氣象資料
- 3、用於地形變化不劇烈的區域
- 4、可靠的風能資料
- 5、三維尺度建物造成的高估結果
- 6、模型獨立假設
- 7、對數型式之垂直風速分布

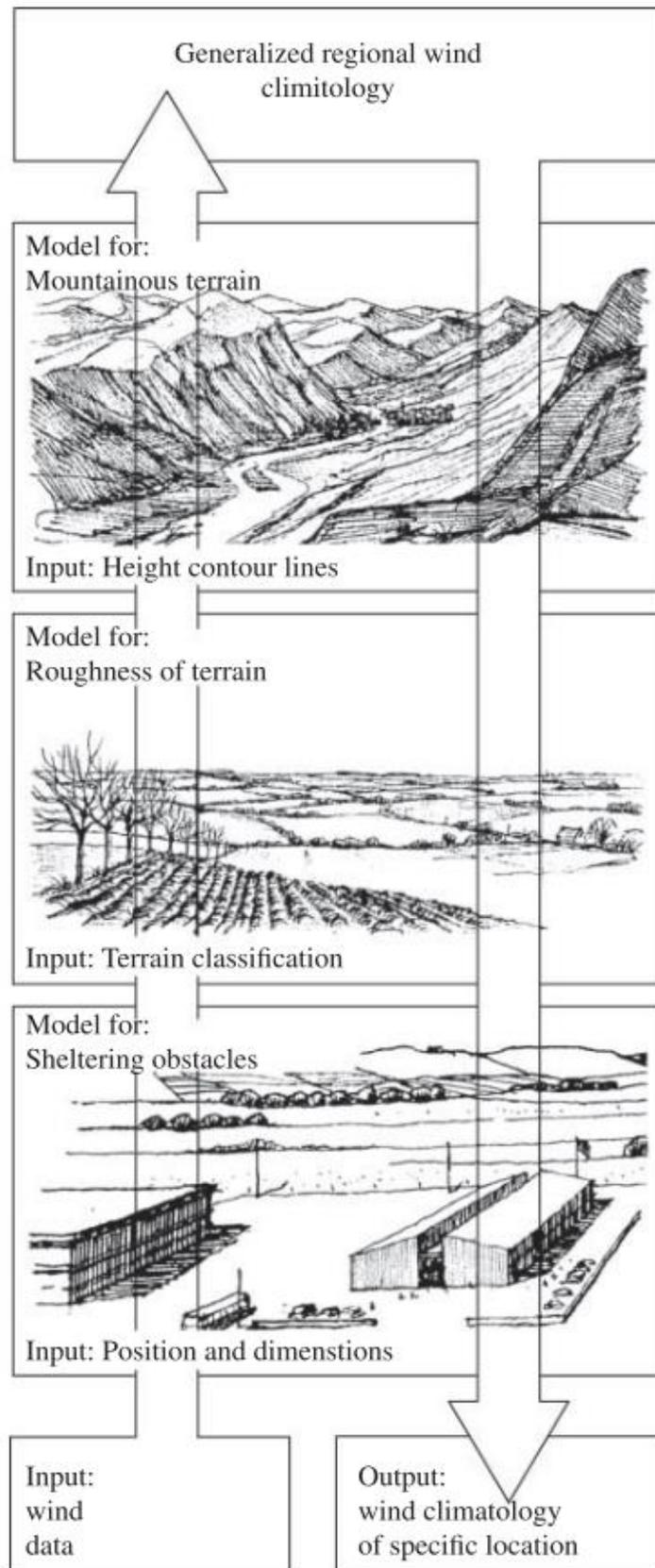


圖 9、WAsP 模型的概念示意圖[5]

CFD 模型

全名為 Computational fluid dynamics (CFD)之計算流體力學模型，是基於求解 RANS 方程式的模式，不需要像 Jackson-Hunt 模式須對程式做線性化的簡化即可求解，故可以處理流場非線性的問題，包括分離與循環流場等複雜現象。目前有許多商用軟體屬於 CFD 模型，著名的包括 FLUENT，OpenFOAM 與 STAR CCM+等，都可用於求解二維/三維，層流/紊流、可壓縮/不可壓縮，黏滯流/非黏滯流等各種不同的流場問題。但相對的，要使用 CFD 這樣的分析工具，需要具備一定程度的專門知識，包括數值分析與流體力學與計算流體力學等學識，且需要足夠強大的電腦硬體才能進行複雜的計算案例，因此一般會搭配線性化的模式來進行風資源評估，而不會完全只用 CFD 模型一種工具進行分析。有一些研究則是針對相同場域進行分析，採用包括線性化的程式與 CFD 模型進行比較，結果顯示，在地形變化不大的區域，兩者分析的結果並無明顯的差異，但在複雜地形時，CFD 模式較能夠掌握到複雜變化的趨勢，但一般而言，以通用性來說，線性化的模式還是較佳[6,7]。

中尺度氣象預測模型

全名為 Meso Scale numerical weather prediction (NWP)模型，與 CFD 模式一樣是求解 RANS 方程式，但同時包含大氣的現象，包括蒸發、冷凝、雲層、輻射與紊流等，如圖 10 所示。此類著名的模式包括 KAMM[8]、MM5[9]、RAMS[10]與 WRF 等。除了風場分析，NWP 類型的模式亦可用於進行預測等工作。對於風場與所搭配之電網系統而言，若能提前 1 小時甚至數小時之前預知風場與風電之變化趨勢，將可提前應因，並做出適當之調控，對於運轉與維護而言，具備能夠準確地預估風能的變化是相當重要的技術。

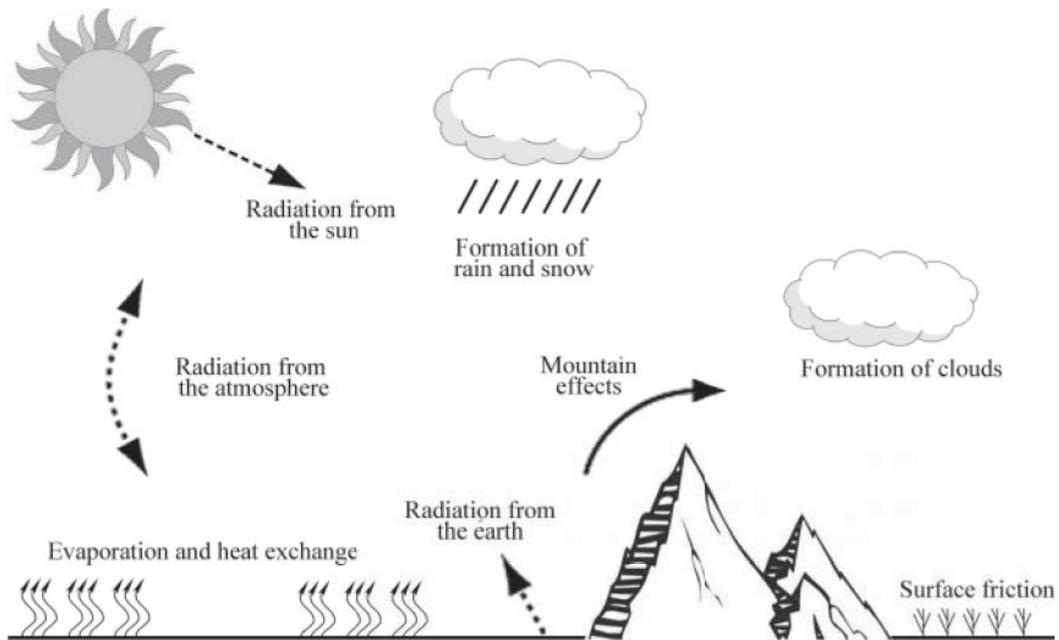


圖 10、中尺度氣象預測模型概念示意圖[2]

三、風場物理特性及微觀選址

一般而言，一個風場包括一座以上的風力發電機，且風機之間是經計算過後，有策略性的排列，以獲取最大的風資源，並降低風機之負載(load)。風機之間距大小主要考量是風機與風之互動，以及其與鄰近風機之效應，即為尾流效應(wake effect)。

Betz 極限

Betz 極限是理論上能夠由風場中能夠獲取的最多能源，於 1966 年由德國物理學家 Betz 所提出[11]。依據其理論，不論任何形式的風機系統，能夠從風能當中獲取得最大能源不會超過 $16/27(59.3\%)$ 。其理論模型示意圖，如圖 11 所示。

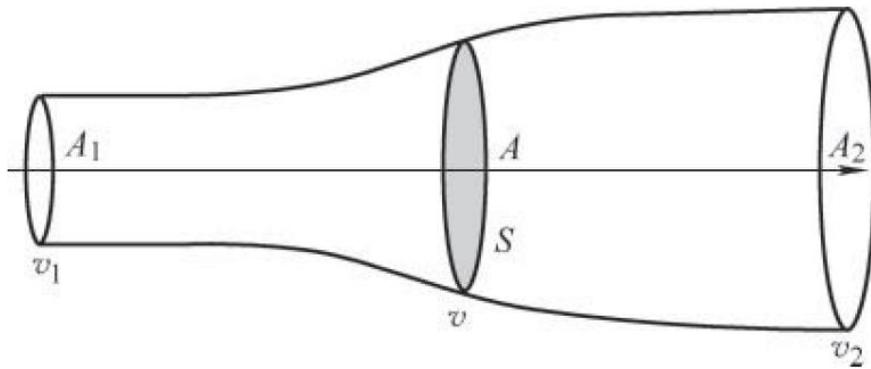


圖 11、Betz 理論模型示意圖[11]

能量係數(Power coefficient)

Betz 極限是理論上風機能獲取得能源的上限，而風機實際獲取之能源除上流場中的動能，則稱為能量係數(Power coefficient)，其定義如下：

$$C_p = \frac{2P}{\rho AV^3} \quad (1)$$

推力係數(Thrust coefficient)

另一重要參數，推力係數，是指風機轉子從自由流動之風場當中獲取之動量(momentum)之比例，其定義如下：

$$C_T = \frac{2T}{\rho AV^2 R} \quad (2)$$

風機性能曲線(Wind Turbine Power Curve)

風機性能曲線，其示意圖如下圖 12 所示。

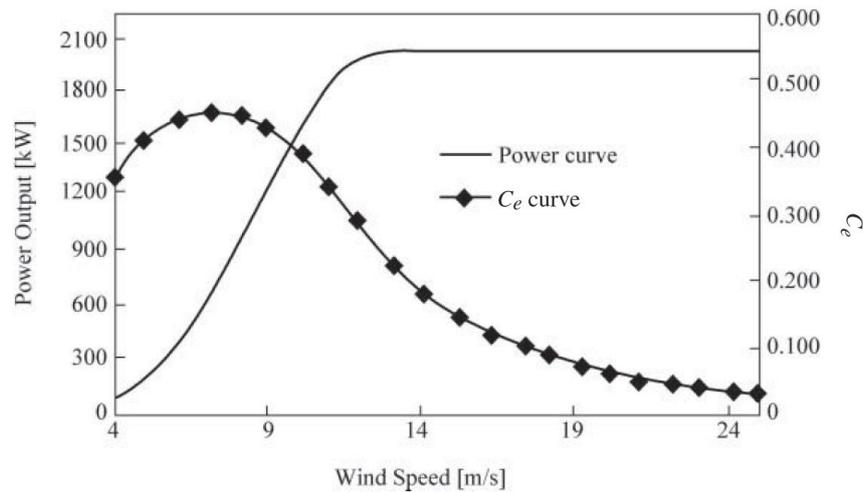


圖 12、典型之風機性能曲線

這個圖包括風機在不同風速下所能產生的發電量，與風機的效能曲線 C_e 。效能曲線是指能量係數 C_p 再乘上風機之機械效率與發電量轉換效率所得。此資訊是由風機製造商遵循 IEC 61400-12-1: Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines [12]所建立，供採購者挑選與分析時參考之用。

風機尾流效應(Wind Turbine Wake Effects)

風機是將空氣中的動能以葉片擷取轉換為機械能後，再轉換成電能，因此氣流流經風機後，其動能必定會減少並改變形態，同時提高紊流強度，如同在風機後面有一個類似影子的區域，此效應稱之為尾流效應。風機之尾流效應，其示意圖，如下圖 13 與圖 14 所示。



圖 13、風場尾流效應示意圖[13]

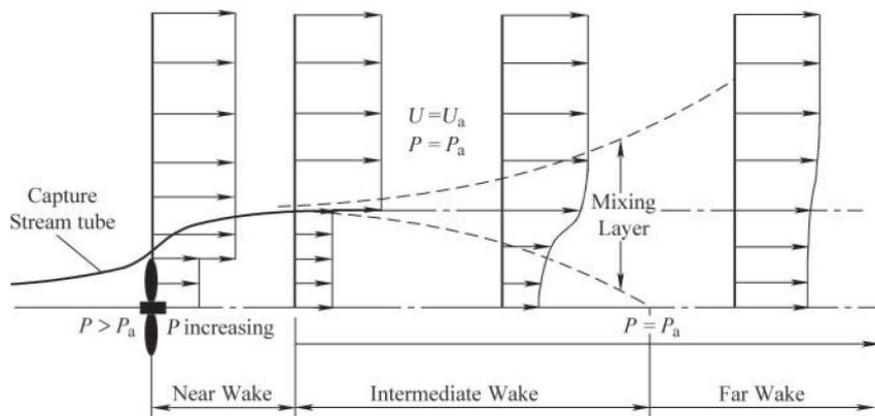


圖 14、風場尾流效應理論結構圖[14]

風機的尾流效應是風場最主要的損失來源，因此風機在風場內的擺設須經計算，並以最佳化的方式進行風機的設置，以降低損失，提高整體發電效能。但由於尾流效應的現象甚為複雜，一般會將風速的損失與紊流強度的增加這兩個效應分開計算。在複雜地形的區域，地表高程的複雜變化也會影響尾流的發展，使得整體的計算分析更為複雜，需要更高階的數值流場模型才能計算。2008 年的文獻採用 N-S 方程式求解，搭配 k-omega 之紊流模式進行計算 [15]，結果顯示，風機的尾流效應會持續到下游的 20 倍風機直徑的距離。

容量因子(Capacity factor)

容量因子是風機實際產生的發電量除以風機全程以額定功率運轉的發電量之比率，可用於各別風機，或特定風場的性能。做為風場選定與風機擺設情況來說是重要的參數，一般介於 20% ~ 40% 之間。

風機選定

考量的因素包括風場特性，適合的風機種類，乃至於價格與製造商的可靠度等，都必須列入考量。表 2 是 IEC 的標準所列出的風機級距，可依據須開發之風場之特性，進行風機類別的選擇參考。

表 2、IEC-61400-1 之風機分級表

Wind turbine class	I	II	III	S
V_{ave} (m/s)	10	8.5	7.5	User defined
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	
$V_{50,gust}$ (m/s)	70	59.5	52.5	
I_{ref}	A	0.16		
	B	0.14		
	C	0.12		

須考量包括平均風速與紊流強度兩個參數。對於紊流強度較高的區域，風機會設計的比較堅固，但相對的其容量因子就會較低。一般而言，整個風場會採用相同的風機，但是對於比較特別的風場而言，亦可採用 2 種或是數種不同的風機，並安裝在不同的高度，以盡可能的獲取該風場的風能，但建議不同種類的風機應屬於同一系列，且是同一個製造商所生產較佳。在前述的準備作業完成後，尚須至現地進行調查，以了解地區的特性。整體微觀選址的流程如圖 15 所示。在初步分析完成，並確定所選定的風機能夠承受該地區的風況所產生的負載後，即可進行實地調查，並調整先前規劃的風機擺設設計。接著進行發電量的估算與負載確認後，即可完成微觀選址的最終報告。

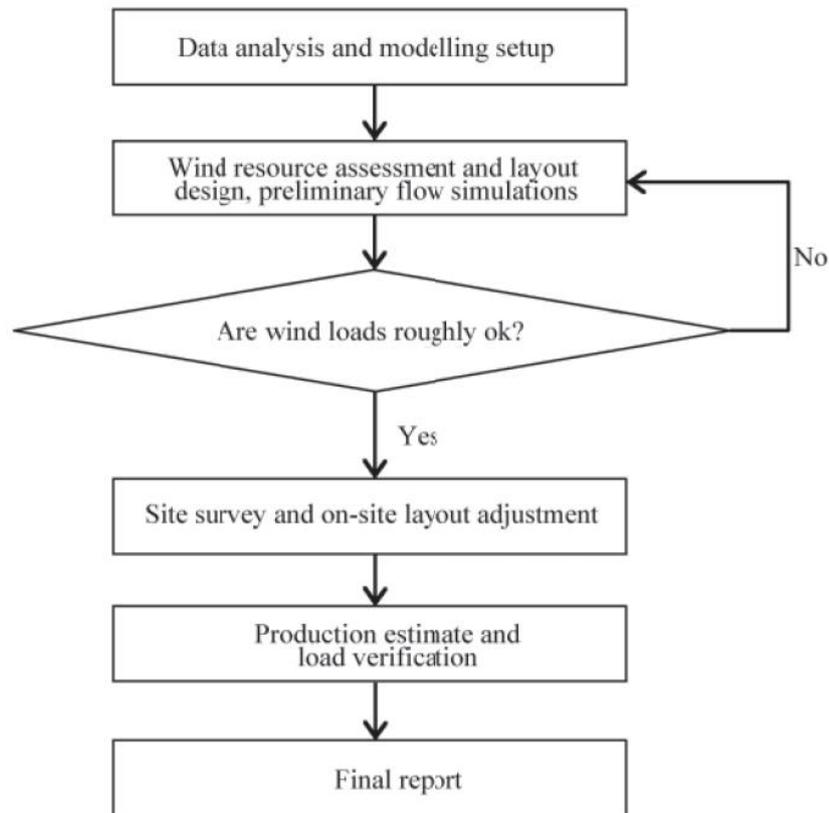


圖 15、微觀選址流程

四、統計分析

因為量測系統量測到的風況資料，包括風速與風向，是會隨時間與空間而變動的，亦即是具有隨機性的數據，因此需要進行統計分析，就是所謂的機率密度分布(probability density distribution)的處理。就統計而言，短期是看不出規則的風速變化資料，以長期資料就可以看出規律，並且具有可預測性。因此在風資源評估的流程當中，將風況資料進行統計分析不可獲缺的一個流程。

紊流強度

紊流對於風機的元件是有損害的，因為較高的紊流會造成風機的疲勞損傷而減少可用年限，另外也會嚴重的影響風機的發電效能、尾流效應與產生噪音等負面的因素。各別的紊流現象在本質上是不可預測的，但導入統計的概念後，則可以分析一些紊流現象的特性。在風

能工程上面，常用的參數：紊流動態(I)一般用於度量在一段時間內(例如 10 分鐘)，風速變化的程度。定義為水平風速的標準差除以 10 分鐘的平均風速。在某一固定的平均風速之下，風速的變化範圍越大，則對應的紊流強度就越高，相反的，較穩定的風速下則紊流強度就會較低。一般而言，風速與紊流強度的關係，如圖 16 所示。另言之，平均風速較高的地點，相對應的紊流強度是較小的。IEC 61400-1 (2005) [16]使用平均風速 15 m/s 之紊流強度做為風機分級的參考值。另外對於離岸風場而言，較高的風速通常也會導致較高的波浪，同時會增加流場當中的紊流動能，這一點是跟陸域的情況較不相同。

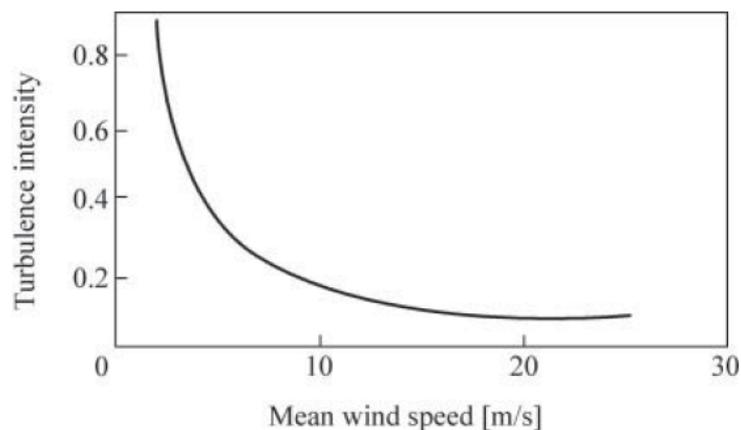


圖 16、紊流強度與平均風速關係示意圖

韋伯分布(Weibull Distribution)

就數據分析而言，風速只會在數值的一側變化，且不會是負值，因此很適合用雙參數的韋伯分布來描述，此函數是由瑞典數學家 Waloddi Weibull (1887-1979)所建立。韋伯分布提供一個圖形化的呈現方式，用以說明風速在一段時間內，以特定風速流過的頻率。雙函數的韋伯分布，可用下式表示：

$$f(v) = \frac{k}{a} \left(\frac{v}{a}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{v}{a}\right)^k \right] \quad (3)$$

其中 k 是形狀參數，而 a 是尺度參數。不同的形狀參數的作圖，如圖 17 所示。當 k 為

1，韋伯函數則變成指數函數， k 為 3.5 時，則曲線接近常態分布，當 k 值為 2 時，則變成雷利函數(Rayleigh distribution)。另外 a 值的單位是 m/s，一般會跟平均風速成正比。韋伯函數的極值是在平均值的左側，此意味著大部分風都會低於平均風速，而右側的長尾則表示高風速的數據。

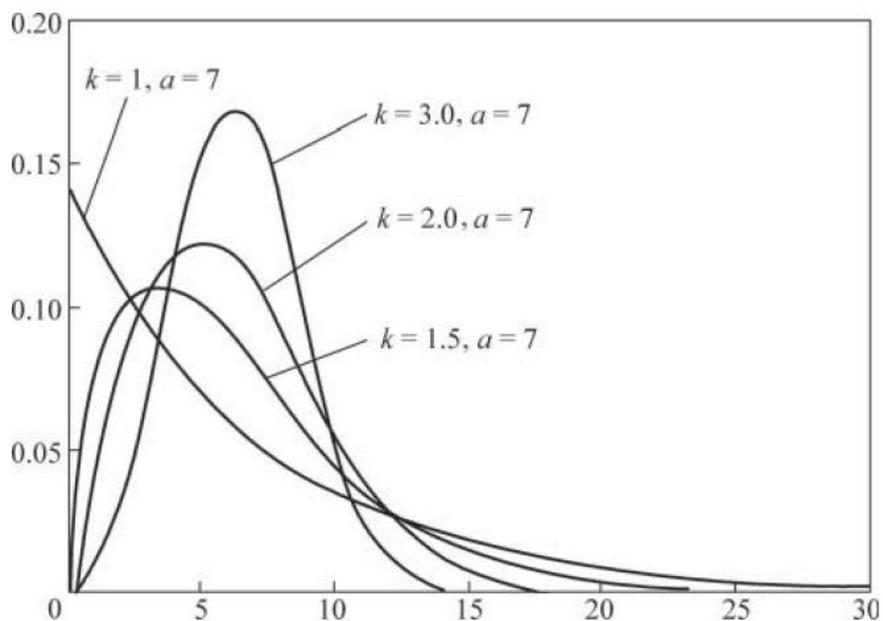


圖 17、雙參數之韋伯概率密度函數分布圖

下圖 18 是將量測的風速與採用韋伯函數描述後作圖的比較。

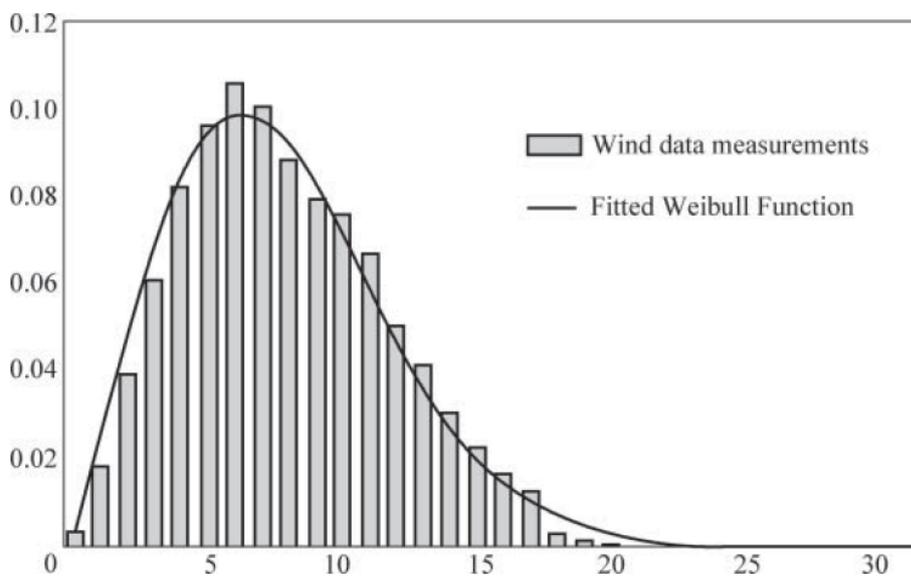


圖 18、量測風速與韋伯函數分布比較圖

另外還有韋伯累計分布函數，是用於計算在特定風速範圍的發生機率，以下式表示：

$$F(v_x) = P(v < v_x) = \int_0^{v_x} f(v)dv = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{a}\right)^k\right] \quad (4)$$

因此，在特定風速範圍的風速機率即為：

$$P(v_1 < v < v_2) = F(v_2) - F(v_1) \quad (5)$$

$$P(v_1 < v < v_2) = \exp\left[-\left(\frac{v_1}{a}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_2}{a}\right)^k\right] \quad (6)$$

韋伯累計分布函數之示意圖，如下圖 19 所示。

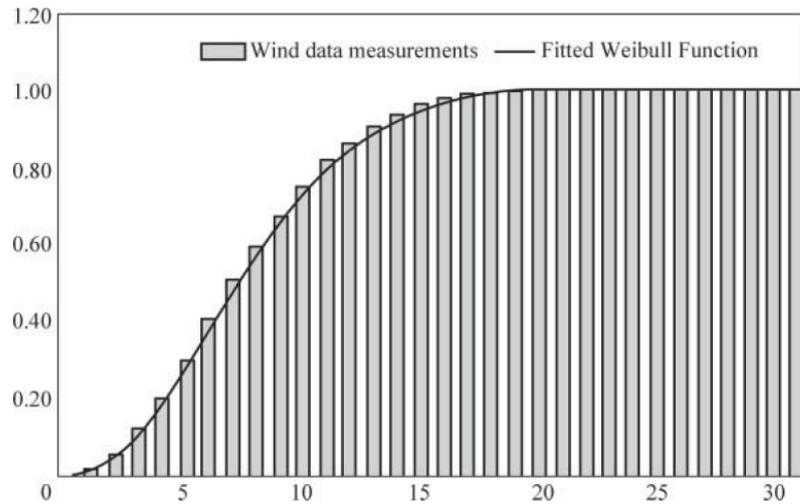


圖 19、韋伯累計分布函數示意圖

雷利分布(Rayleigh Distribution)

如上所述，雷利分布是當韋伯分布的形狀參數 k 值為 2 時的特例。雷利分布在 IEC 的標準當中被用於定義風機的負載案例[16]。將形狀參數 k 設為 2 後，雷利分佈之機率函數(PDF)與累計密度函數(CDF)如下式所示：

$$f(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{V_{ave}^2} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{V_{ave}} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$F(v) = 1 - \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{V_{ave}} \right)^2 \right] \quad (8)$$

甘貝爾分布(Gumbel Distribution)

在統計上而言，對於一個隨機過程當中著重於平均現象之理論稱為中央極限理論(central limit theorem)，而著重在極值與罕見情況的稱之為一般性極值分布(generalized extreme value, GEV)，或 Fisher-Tippett 理論。甘貝爾分布即屬於 GEV 分布的其中一種，其數學形式如下[17]：

$$F(x) = \exp \left[-\left(1 - k \left(\frac{x-\beta}{a} \right) \right)^{1/k} \right], k \neq 0 \quad (9)$$

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(1 - \left(\frac{x-\beta}{a} \right) \right) \right], k = 0 \quad (10)$$

其中 β 為位置參數， a 為尺度參數， k 為形狀參數。其中形狀參數 k 值的改變可以轉換成 3 種不同形態，如表 3 所示。

表 3、GEV 參數形態與特性[17]

Name	Type	k	Curvature	Lower bound	Upper bound
Gumbel distribution	1	$k = 0$	Linear	None	None
Frechet family	2	$k < 0$	Negative	$alk + u$	None
Weibull family	3	$k > 0$	Positive	None	$alk + u$

五、量測、關聯與預估

如同先前所提到，風是短期跟長期會有強烈的變化，且風場一般會預定運轉約 20 年左右，但風能評估大概都只看 1~3 年左右的期程，並且在數月之間就必須做出重大的決定。就風能

評估而言，至少會需要 1 年左右的風況資料用於分析模式當中，但這樣一來對於每一年的變化就無法掌握。

因應此現象所建立的量測-關聯-預測(measure-correlate-predict, MCP)之方法可用於擴展風能資料到較長的時間，一般可到 10 年以上。此法是將測站的短期風況資料與附近的長期參考資料藉由並存(concurrent)或是重疊法(overlap)建立統計關係式，並利用此關係式來預測整個長期的情況。MCP 法已成產業上為解決此議題的主流方法。而決定預測品質的最重要決定因素就是如何將測站的短期與鄰近參考長期資料建立關係式的過程[18]。目前有數種 MCP 方法，包括回歸法、矩陣法與類神經網路法等模式。

關聯係數(correlation coefficient)

在統計上而言，關聯是指兩組隨機的變數或資料彼此之間相關的可能性，相關性越高時，就可預測出較佳的結果。此係數一般用 R 來定義兩個參數(例如 X, Y)之間的相關性，其定義如下：

$$R(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (11)$$

$$cov(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_X)(Y_i - \mu_Y) = E[(X_i - \mu_X)(Y_i - \mu_Y)] \quad (12)$$

在關聯性的步驟部份，採用的是 R² 這個係數來做判斷。此數據是介於 0 到 1 之間，是指毫無關聯到完全相關的兩個極端情況，用於判斷測站風況與參考長期資料彼此之間的關聯性的重要參數。但要注意的是，關聯係數高也不能保證預測結果一定會很好。下表 4 是參考資料關聯性的品質表。

表 4、關聯係數與參考資料品質一覽表

Correlation coefficient R^2	Quality of reference data
0.9 ~ 1.0	Very good
0.8 ~ 0.9	Good
0.7 ~ 0.8	Moderate
0.6 ~ 0.7	Poor
<0.5	Very poor

平均區間的影響

當測站資料與參考資料的關聯性不佳時，可採用較長平均區間的方法來改善，一般可以到 1 天或 1 周的區間。而此舉可改善的原因有二：首先，較長的平均區間可以讓每日的變化更平順，但更重要的原因是來自兩個站之間的距離。當兩個測站比較近時，使用較短(10 分鐘到 1 小時)的平均區間，且可同時記錄兩個測站的風況歷程。當兩個站的距離較長時(50~100 公里)，則應該用 6 小時以上的平均區間進行資料前處理，以有效的優化彼此之間的關聯性。

圖 20 表示不同平均區間對於關聯係數的影響。由此圖可知，當平均區間從很短增加時，關聯係數會有急劇的上升變化。從 1 天到 7 天的改善是最明顯的，超過 7 天之後改善就會趨緩。

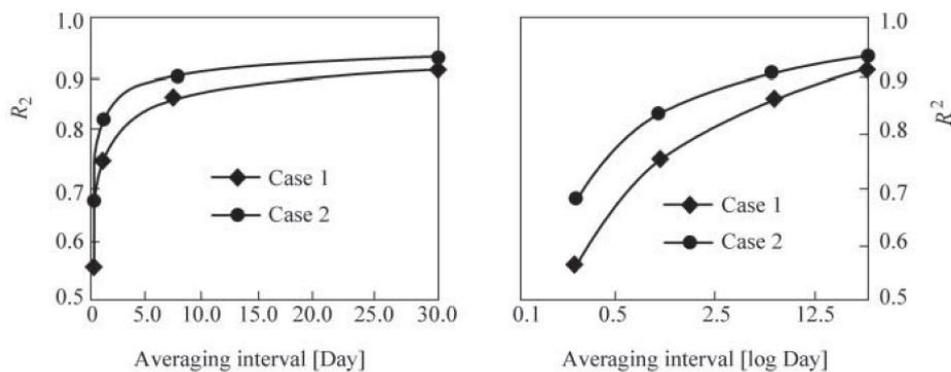


圖 20、平均區間對於關聯係數影響比較圖

在判斷平均區間的原則方面，最佳的選擇是天氣分布尺度除以其平均移動速度。

回歸方程式與殘值

回歸分析是統計學中一種建立參數之間關聯性的方法。預測的標的是一個叫做回歸方程式的轉換方程式。如果標的測站風速是 Y ，而參考資料是 X ，則回歸方程可表示為：

$$Y_i = f(X_i) + e_i \quad (13)$$

$$\hat{Y}_i = f(X_i) \quad (14)$$

其中 e 是殘值(或誤差)，表示兩者之間關聯後之隨機誤差值。下圖 21 是一個案例比較目標測站與參考長期風速的變化圖。從圖中可看出，在數據上有差異，但變化趨勢相似，因此可以將兩者建立一組數學關係式。

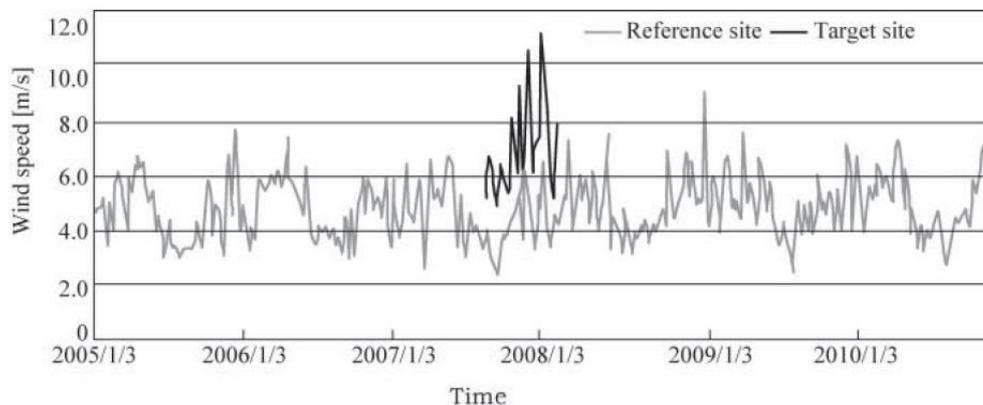


圖 21、目標測站與參考地區風速變化比較圖

一旦回歸關係式建立，就可以進行預測。在一段數據區間內進行預測一般稱之為內插(interpolation)，在其外則稱之為外插(extrapolation)。下圖 22 是採用一組簡單線性回歸法預測之比較圖。

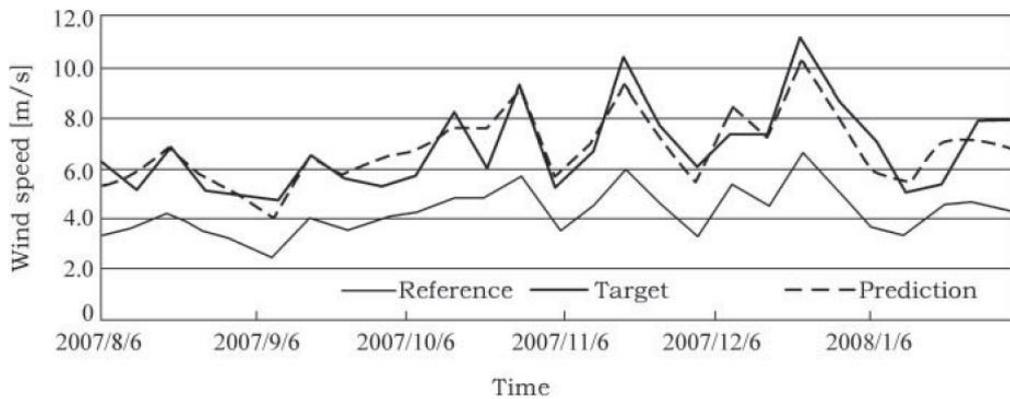


圖 22、採用簡易線性回歸內插預測之風速變化比較圖

同樣採用簡易線性回歸方式，就目標站的結果進行長期之外插預測，如圖 23 所示。外插預測的效果與回歸的假設有很重大的關係。越往外部進行外插預測，則可能導致嚴重的誤差。一般在外插的部份是建議連同回歸準確度驗證與不確定性分析同時進行。

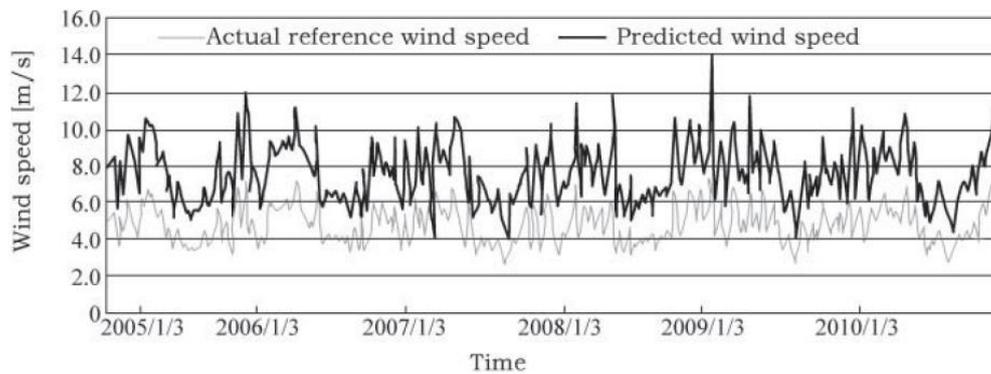


圖 23、採用簡易線性回歸外插長期預測之風速變化比較圖

數據驗證(data validation)

數據資料當中較偏離的數值不應列入回歸分析當中。如果偏離的數據是來自於誤差，則建立的回歸關係式就會有所偏差[19]。針對此議題，可以先將原始數據以圖形呈現進行觀測，再針對可能是量測設備異常導致的不正常數據進行搜索及處理。統計學上可用庫克距離 (Cook's distance) 來輔以判斷數據是否有所偏離之異常現象，是用於判斷如果將其中一點的資

料刪除後，則回歸關係中之參數會有怎樣的變化[20]。有著較高殘值之數據也會有較大的庫克距離。如果某數據的庫克距離大於 1(或是某一個使用者自行定義的門檻)，則需要針對此數據進一步的探討其適用性[21]。庫克距離的計算，如下式所示：

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^n (\hat{Y}_j - \hat{Y}_{j(i)})^2}{p \cdot MSE} \quad (15)$$

庫克距離大於設定的門檻時，並不是可以直接將該筆資料刪除，而是應該在分析過程作為一個警示。如果直接刪除較大偏離的數據固然可以提升回歸的相關性，但有關此數據的重要資訊也同時會喪失。

風力發電之 MCP 方法

風力發電工程上，目前已發展許多種 MCP 之方法論，包括線性回歸法、變異比例法 (variance ratio method)、支持向量回歸法(support vector regression)、韋伯回歸法(Weibull regression)、韋伯尺度法(Weibull scale method)，另外還有類神經網路法(Artificial Neural network, ANN)，其採用較複雜的系統建立關聯方程式，是近年當中較常用的一種方法。

線性回歸法(Linear Regression)

傳統的最小平方線性回歸法較簡單且易懂，而且因為其它較複雜的模式不見得較佳的情況下，這種傳統方法還是有一定程度的接受度[22]。於 1992、1993 年由 Derrick 發表之論文採用簡單線性回歸法進行風能工程的研究，其方程式為[23]：

$$\hat{Y} = f(X) = aX + b \quad (16)$$

將圖 21 的風能數據進行線性回歸分析後，其結果如下圖 24 所示。

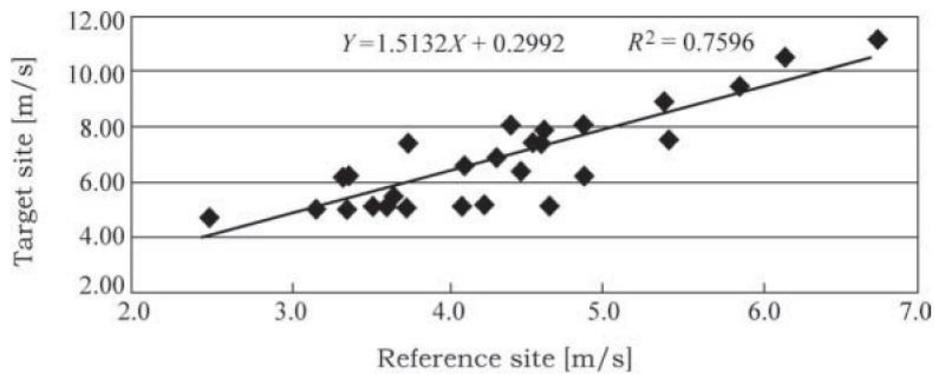


圖 24、簡易線性回歸案例結果

類神經網路法(Artificial Neural Networks, ANN)

類神經網路法(ANN)是發想於動物的中央神經系統之計算模式，其具有機器學習與辨識包括噪音與其它複雜數據形態(pattern)之能力。其架構是以互聯的神經元為核心，將輸入之資訊進行辨識與計算[24]。ANN 是由類似神經突觸的輸入，再藉由數學函式進行計算，而每一個輸出是都各別邏輯函數之神經元之輸入乘上權重再減去部份門檻值(threshold value)之總合(圖 25 左)，可以下式表示。

$$f(\sum_j \omega_{ij} X_i - b_j) \quad (17)$$

其中 X 是每個神經元的輸入， ω 是權重，b 是門檻值。權重越高時，輸入參數的重要性就提高。而數百至數千個神經元之權重是由預先定義好之演算所進行調整。這個調整權重的過程稱之為學習或訓練。訓練的演算法是以疊帶的方式進行，並以最小誤差函數的方式進行計算。以風能資料之 MCP 而言，同流資料為參考與標的站之風資料進行訓練。除了單層，目前也有多層次的 ANN 模式可供使用(圖 25 之右)。除了輸入層，還有隱藏層，而訓練過程同樣是就這些不同層級之神經元之權重進行訓練，以獲取最小誤差函數之結果，做為計算輸出之模式[25]。在風電工程上使用 ANN 進行分析，有以下幾點優勢：(1)可辨識非線性之關係，(2)可考量過去的資料(而不只是同步資料)，(3)可用 1 組以上之長期來源資料[26]，但在實際使用上的困難度會較高。

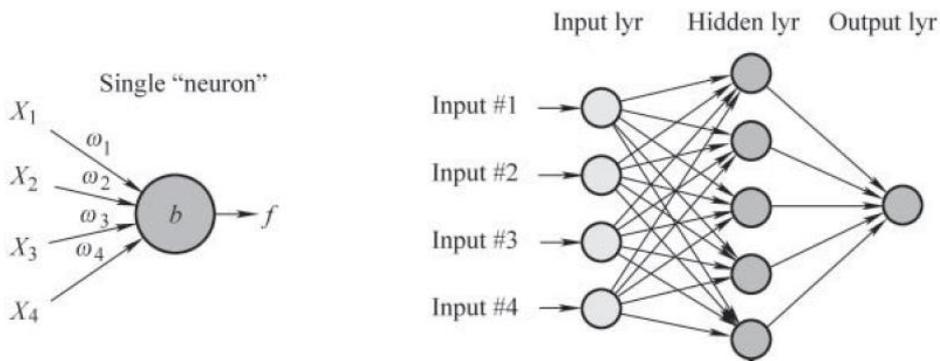


圖 25、單層與多層之類神經網路架構圖

六、風場發電量估算

在進行風場效能評斷時，會需要知道一座風場在其運轉 20 年期間預計能夠發出多少電量，再考量相對應的成本，就能完成整體的經濟效益評估作業。因為風力發電不需要消耗燃料，所以大部份的成本來自初期投入的部份與維護成本。但風能會隨時間變化的特定會讓評估風場發電量過程當中具有不確定性，提高精確預估的難度。在不確定性較多或多高時，一般會採取較保守的結果供後續的流程進行。目前市面上有許多程式可供進行風場發電量估算。一般都包括資料分析，統計處理、地形地貌效應與發電量計算等功能。雖各別軟體之間有所差異，但整體分析流程相似：(1)建立地圖資訊，包括高程分布、粗糙度分布、測站邊界等，(2)分析風資料與統計處理，(3)風機選擇與擺設，(4)初始發電量計算，(5)考量損失與不確定性後之淨發電量計算。

毛發電量與淨發電量(Gross and Net AEP)

毛發電量是風場在不考量任何損失情況下之數據。而商用軟體一般會把尾流損失列入考量後，得到另一個數據，但其它損失效應則要根據該風場與開發計畫的特性各別去評估後，再納入考量，以精確地計算該風場之淨發電量。典型的風場發電量損失約在 20%左右，但一些較極端的案例顯示損失量會在 10%到 40%之間變化。不論從工程面與財務面，盡可能的降低損失，並精確地估算發電量都是極為重要的評判參考。

尾流效應(Wake Losses)

尾流效應對風場之影響在先前已有提及，一般尾流效應造成的損失約在 3%到 15%之間。如果大於 15%，則需考量調整風機擺設的方案。而一般陸域的風機在對風的方向之間距應不少於 5 倍的風機直徑，離岸則需要到 9 倍以上；而垂直風的方向的間距則各別是 3 倍與 5 倍以上的風機直徑的間距，做為風場擺設的參考。

可用率損失(Availability Losses)

可用率是指風機或風場在特定期間當中可正常運行的時數占總時數的比率，因此如果風機因損壞或其它因素無法正常運轉，則整體的可用率就會下降，進而在發電量評估方面，造成所謂的可用率損失。典型的風場之可用率損失約在 5%左右，但有些會介於 2%到 10%之間，主要受製造商之技術水準與風場環境匹配與否等因素影響而變化。在整個風場運行的過程中，可用率損失的改變是以類似溝槽的方式呈現，在第 1 年會有明顯的下降，並在後續的大部時間當中都維持在相對低的位置，而接近除役階段則會再上升。因此一般會在開始的第 1 年與最後 3 年的時候設定較高的可用率損失，來進行經濟效益估算的作業。

性能曲線表現(Power Curve Performance)

確保風機能有如製造商所提供之性能曲線之發現，對於風場開發商而言非常重要。風機的性能曲線是在事先定義好的風況下測出來的，因此當真的把風機放到實際的案場後，可能會有不一樣的結果。包括流場之紊流、風剪、風向變化與空氣密度等都會影響風機的實際性能。典型的量測性能曲線的不確定性造成的損失約在 5%左右[27]。

電力損失(Electrical Losses)

風機系統的電力損失主要來自 3 個因素：風機本體、輸電電纜以及變電站。物理上來說，電力損失可分為銅線損失、離子損失、雜散損失(stray losses)與消耗(consumption)。文獻研究數組 MW 等級之風機系統發現，電力損失介於 3.2%至 4.4%之間[28]。典型的電力損失約在 4%到 5%之間。

Curtailement(抑制效應)

抑制效應是指當風機因為環境因素需要進行降載甚至停機時的情況，可能原因包括夜間噪音影響、白天的陰影影響與避開生物移動路徑等。另外高紊流與入流角度變化造成的損耗也是進行抑制的考量因素。電網調度的方式也有可能進行風機的抑制操作。

年發電量之不確定性(AEP Uncertainty)

發電量估算時，還會進行與誤差概念上不同的不確定性分析。誤差是指計算值與實際值的差距，且有可能是零誤差的情況，但不確定性是對於結果的質疑。因為實際值一般不會知道，且未知的誤差也是一種不確定性的來源[29]。對於風場之財務分析而言，不確定性的計算十分重要。了解不確定性的來源，並採取有效的手段降低不確定性，可以有效的提升計算的AEP之準確度，並降低風場財務規劃之風險。

P90, P75 與 P50 AEP

考量不確定性的因素後，可以用機率的方式(PXX)來呈現所計算的年發電量數值。例如P90是指有10%的機會沒辦法達到P90數值之年發電量，如圖26的陰影部份。商業上常用的是P90與P75來進行商業決策。

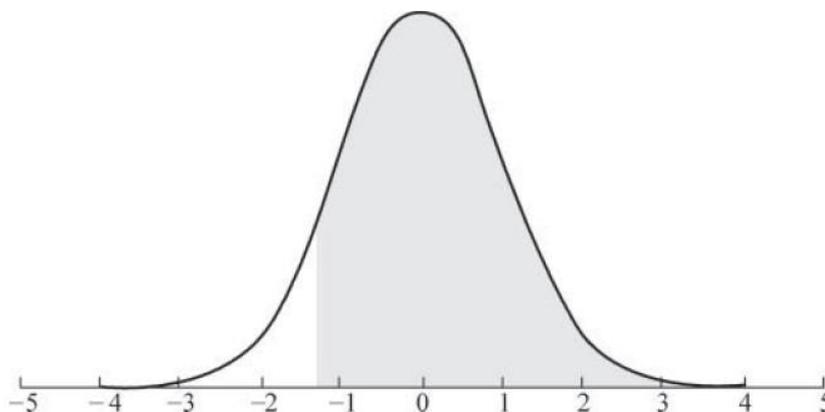


圖 26、常態分布下之 P90 示意圖

在常態分布下，各種不同的表示方式可用平均值與標準差來進行計算如下：

$$P95 = \mu - 1.96\sigma \quad (18)$$

$$P90 = \mu - 1.28\sigma \quad (19)$$

$$P75 = \mu - 0.67\sigma \quad (20)$$

$$P50 = \mu \quad (21)$$

風場模擬的不確定性

風場模擬分析是將測站的資料外推到欲分析的地點與選定的風機高度的數值計算。一般風場模擬的不確定性主要受地形複雜度及與測站之距離影響，大概在 3%到 10 之間[30]。如果一個風場裡面有 5 座以上的測風站，基本上就足夠以統計上學的觀念完整的進行不確定分析與驗證。但一般一個風場只會有 1 到 2 座的測風站與數據，所以在評估不確定性的時候就要靠經驗與猜測的方式進行。

垂直外插(Vertical Extrapolation)

垂直外插是要將測風站高度的風速外推到風機高度的流程，而其不確定性主要是風切分布預測的品質。風切與時間、方向、地形及風速有關。如果風機的高度高於測站的高度，則風切當中應有額外的不確定性應納入考量當中。依照地形的複雜程度，這個額外的不確定性範圍介於 10%到 20%之間[31]。指數形式的風切方程式比較直覺，但近代部份研究改採用對數方程式來描述，可以更精確地獲得垂直方向的風速變化。

水平外插(Horizontal Extrapolation)

將測站的風況外推到欲裝設風機位置後，再依其計算年發電量即為水平外插，是風場評估當中主要的不確定性來源。影響的因素包括地圖品質、量測精準度、風機特性等。另外風機與測站的距離遠近也會影響不確定性的大小。由於評估此不確定性的複雜性較高，一般可

以採用表 5 的數據，就各別風機與測風站的位置進行計算後，再統合成整個風場的整體不確定性。

表 5、不同地形特定下，風機與測站每距離 1 公里之不確定性對照表

Terrain type	WAsP and similar	CFD models
Flat and open	0.5%	0.5%
Smooth hills	1.0%	0.9%
Complex	1.5%	1.2%

風能評估報告

風能評估報告是總結對於欲開發風場的一切重要資訊，供工程人員與財務人員進行後續評估與決策之重要依據，應包含以下項目：

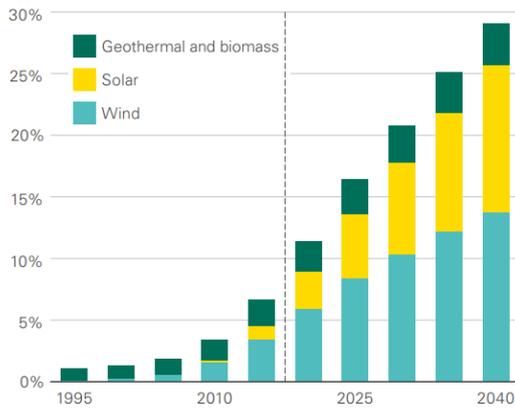
- (1) 測風站與蒐集的風能資料的品質
- (2) 風能統計
- (3) 風場的氣象條件(如結冰、沙塵與鹽害等)
- (4) 風場的一般性條件(地理位置、風機位置、軍事與航空設施等)
- (5) 風機模型
- (6) 風場模擬
- (7) 最佳化風機擺設與毛年發電量
- (8) 風負載條件(入流角度與紊流強度等)
- (9) 不確定性分析與淨年發電量評估
- (10) 環境影響評估(如必要)

另外閱讀數篇由奧爾堡大學所發表之論文與其它相關報告之重點摘錄如下。BP 2019 之報告指出[32]，再生能源當中，風能與太陽能在全球之能源市場當中將有大幅成大的趨勢(圖 27)，

其中以地區分類，佔比最高的地方是歐盟。

Renewables are the largest source of energy growth, growing in importance in global power markets

Renewables share of power generation by source



Renewables share of power generation by region

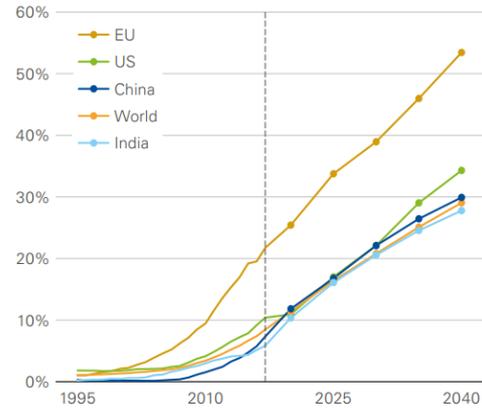


圖 27、BP 報告預估之再生能源發展預估趨勢[32]

B. Möller 等人[33]進行丹麥之風場分析。圖 28 是丹麥之近岸與離岸之適合風場分布圖，圖 29 是平均化後之離岸風場發電成本分布圖。

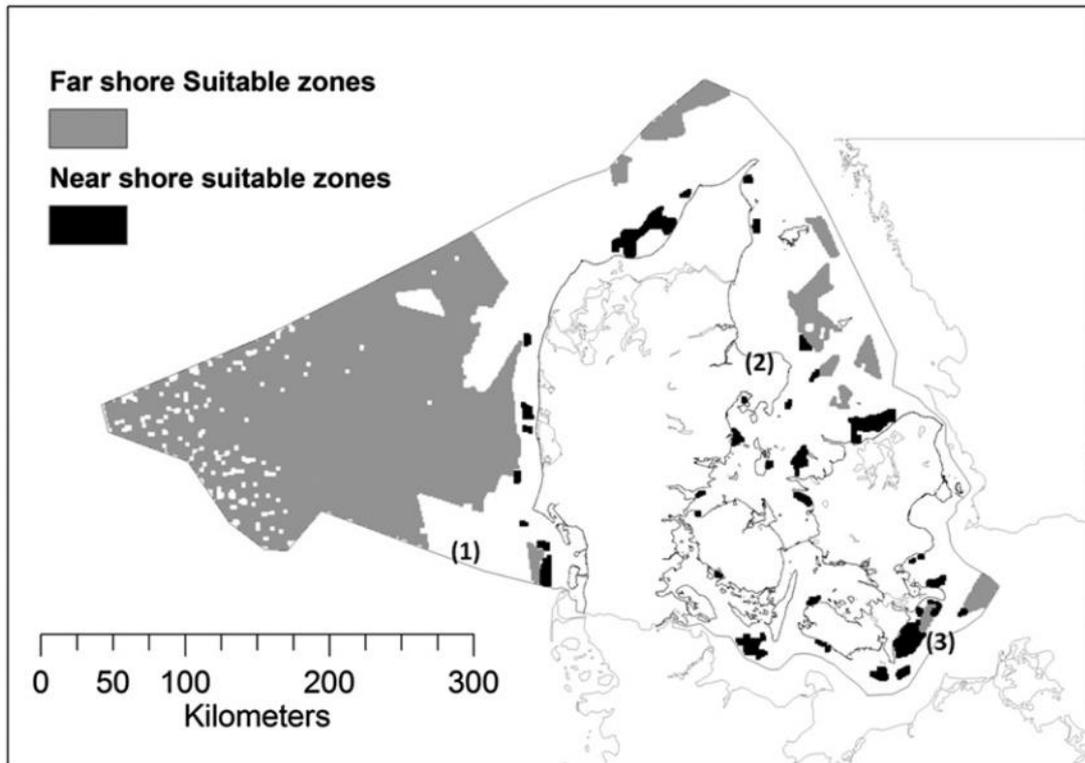


圖 28、丹麥之離岸風場分布圖[33]

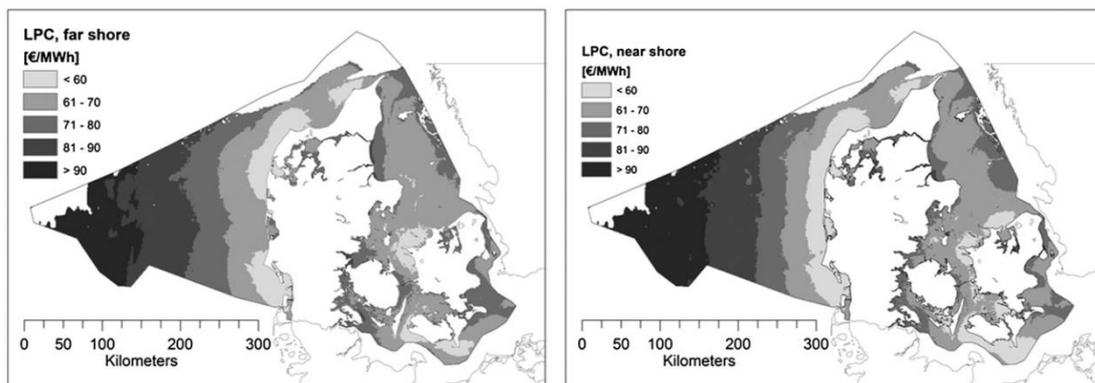


圖 29、丹麥之離岸風場發電成本分布圖[33]

此論文分析結果指出，丹麥的離岸風場年發電量約在 15 TWh/yr，以 2020 年預估值而言，約可提供全國 40% 之需求。作者另外建議，應開發 400 kV 等級之國家型電網系統，以建立更穩定之分散型電力供給系統。而在缺點方面則可能會在大型離岸風場開發方面喪失領先地位，以及在海岸區域造成視覺衝擊等。Möller, Bernd 則進行風能分析[34]，並依分析結果選出適合設置風場之區域分布圖(圖 30、圖 31)。

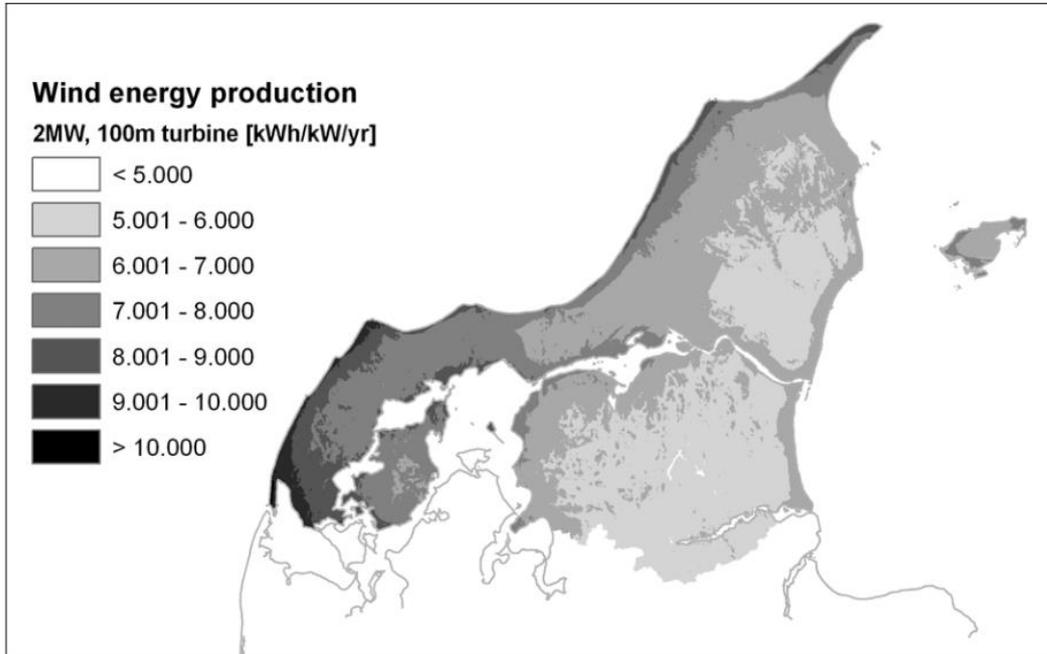


圖 30、風能年發電量分布圖[34]



圖 31、經分析後適合設置風場區域分布圖[34]

但本研究乃是較初步的大範圍，解析度較差的分析結果，後續應用更高解析度之數位高

程模式(digital elevation model, DEM)，並包含局部地區的地形變化效應做進一步的分析。Kwon 與 Ø stergaard 則分析丹麥在 2050 年的能源需求彈性程度[35]。分析的用電需求來自三個部份：居家、商業與工業部門(圖 32、圖 33、圖 34)。

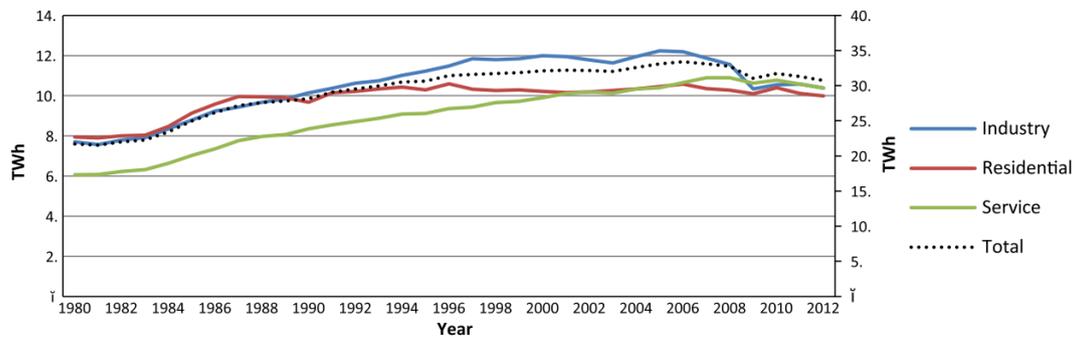


圖 32、丹麥自 1980 年至 2012 年之用電需求變化比較圖[35]

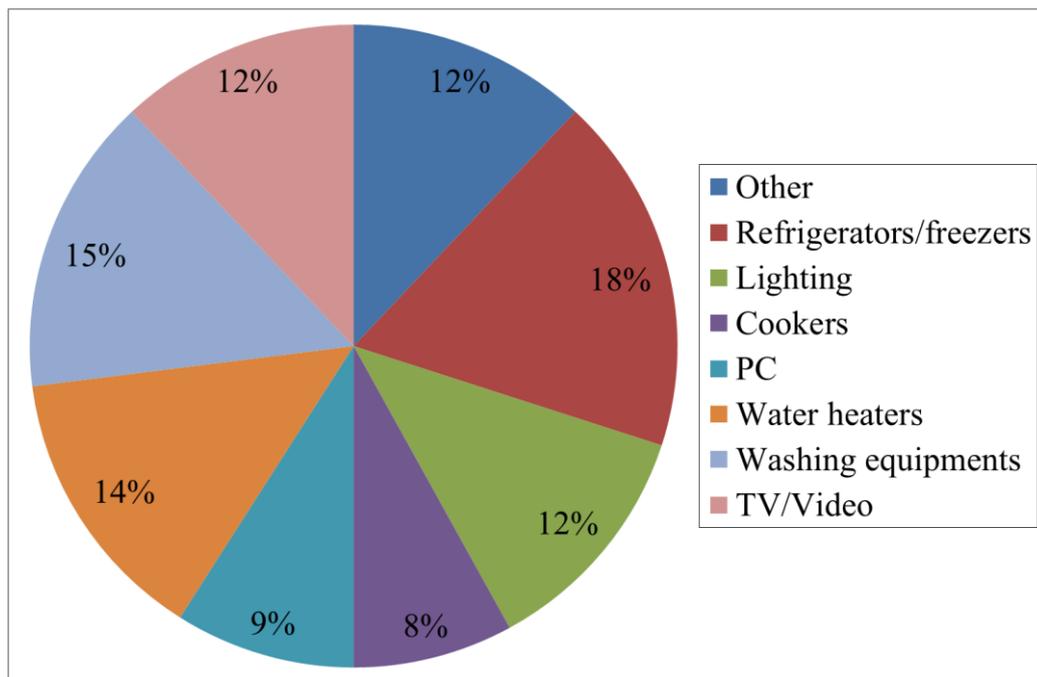


圖 33、丹麥之居家用電類別佔比圖[35]

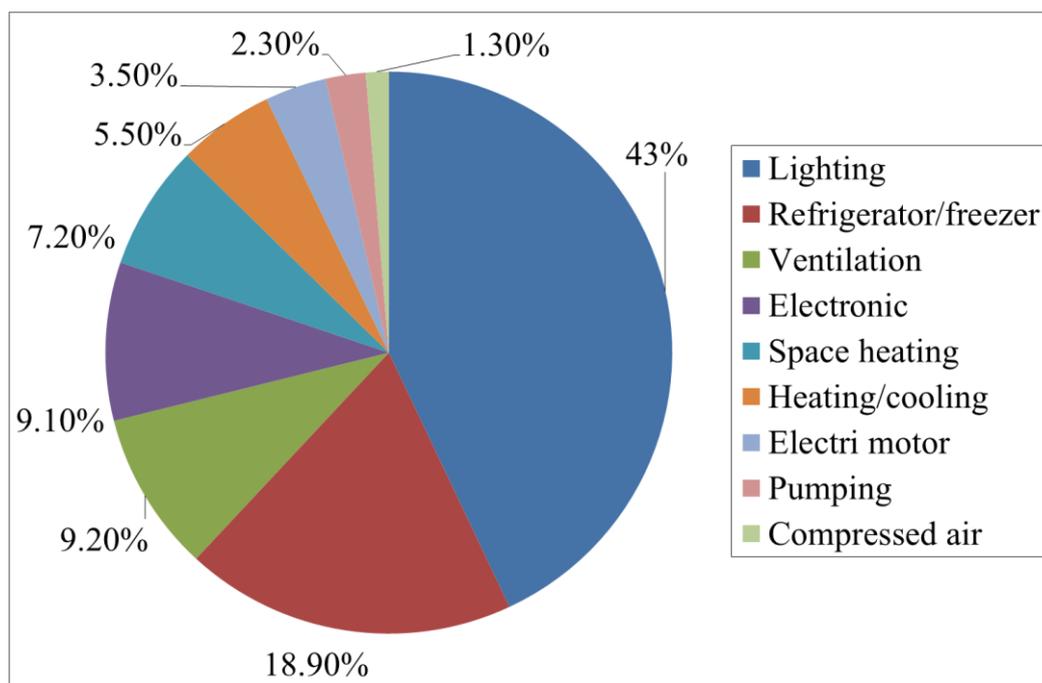


圖 34、丹麥之商業用電類別佔比圖[35]

表 6、丹麥設定之 2050 能源規劃表[35]

CC2050	
<i>Electricity production capacity</i>	
Offshore wind	14,600 MW
Onshore wind	4000 MW
Wave power	450 MW
PV	3250 MW
CHP capacity	2500 MW
Condensing power plants capacity	3700 MW
<i>Flexible technologies</i>	
Heat pump (District heating)	4504 MW
V2G	21 TW h
Annual Electricity consumption	45.4 TW h
Heat demand from district heating	36.9 TW h
Heat demand from individual heating	31.75 TW h
Biomass consumption in Transportation	11.45 TW h
Biomass consumption in industry	10 TW h
Waste	12 TW h
Interconnection capacity	12,000 MW
Efficiency of CHP	40% (electricity), 50% (heat)
Efficiency of condensing power plant	45%
COP of heat pump	3

表 7、丹麥 2050 能源規劃與彈性需求情境比較表[35]

Parameters	CC2050	FD2050	Difference
<i>International exchange</i>			
Import (TW h)	1.23	0.98	-0.25
Export (TW h)	14.83	14.02	-0.81
<i>Condensing power plant operation</i>			
Electricity production (TW h)	13.86	13.52	-0.34
Biomass consumption (TW h)	30.8	30.04	-0.76
<i>Consumption</i>			
Electricity consumption (heat and transport sectors included)	88.05	88.09	+0.04
Heat consumption	51.26	51.26	0

但分析結果顯示，在各別部門進行調控後，對於整體影響都不大，反而是國際之間的併網輸電的變化對於整體能源系統之衝擊最大，在可能的國際輸電需求變化範圍內，將有高達 1~2 GW 的輸配電線的需求需要投入建立(表 6、表 7)。Andersen 則針對浮動式離岸風機建立分析技術[36]。除了模擬分析外，亦進行浮動式載台縮尺實驗，並比較兩者之間的差異(圖 35)。

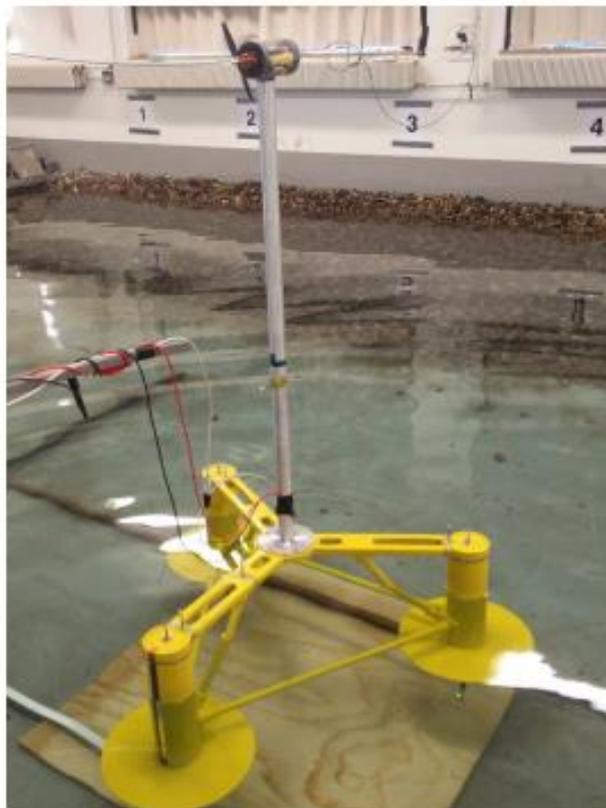


圖 35、Andersen 建立之浮動式離岸風機測試系統[36]

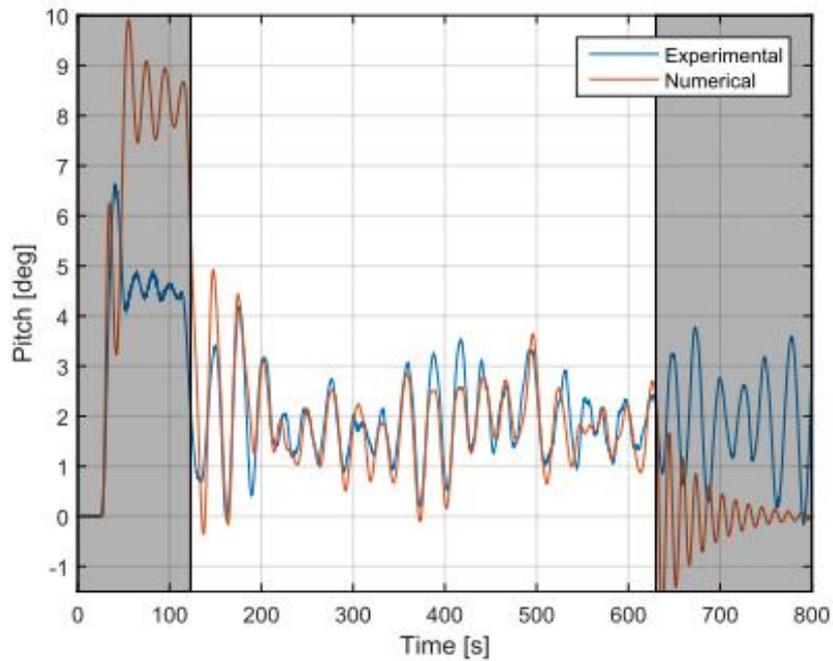


圖 36、Andersen 之浮動式離岸風機實驗與計算結果比較[36]

因其採用之數值軟體 FAST 在其研究期間改版後，具備能夠分析纜繩之複雜現象的能力，包括動態與多節式設計。經與實驗結果比對，具備極佳之一致性。Murcia 與 J. D. Sørensen 等人針對一座丹麥之離岸風場(圖 37)發電量(圖 38)之不確定性提出新的分析方法進行探討與研究[37]。

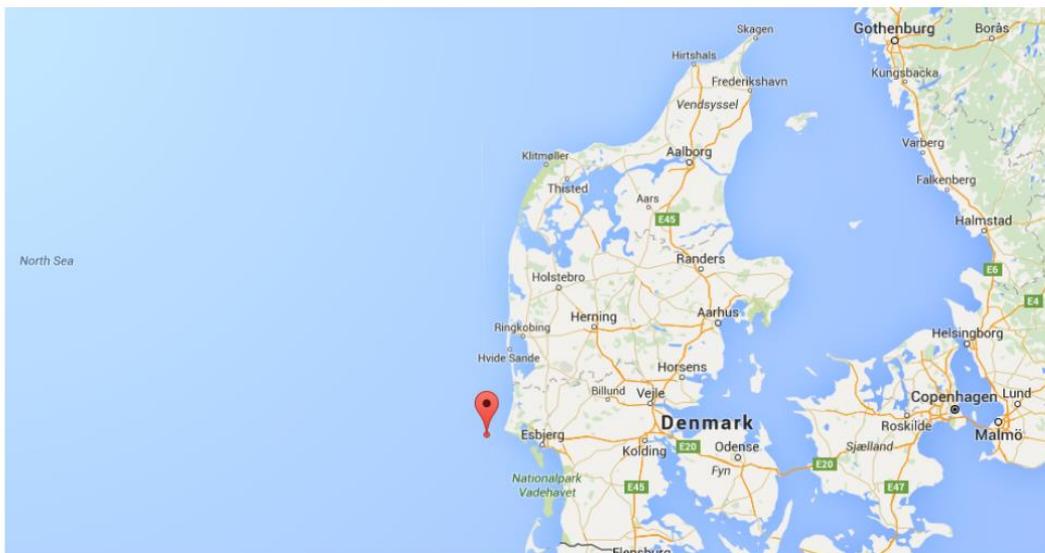


圖 37、Murcia 與 J. D. Sørensen 等人研究分析之離岸風場案例[37]

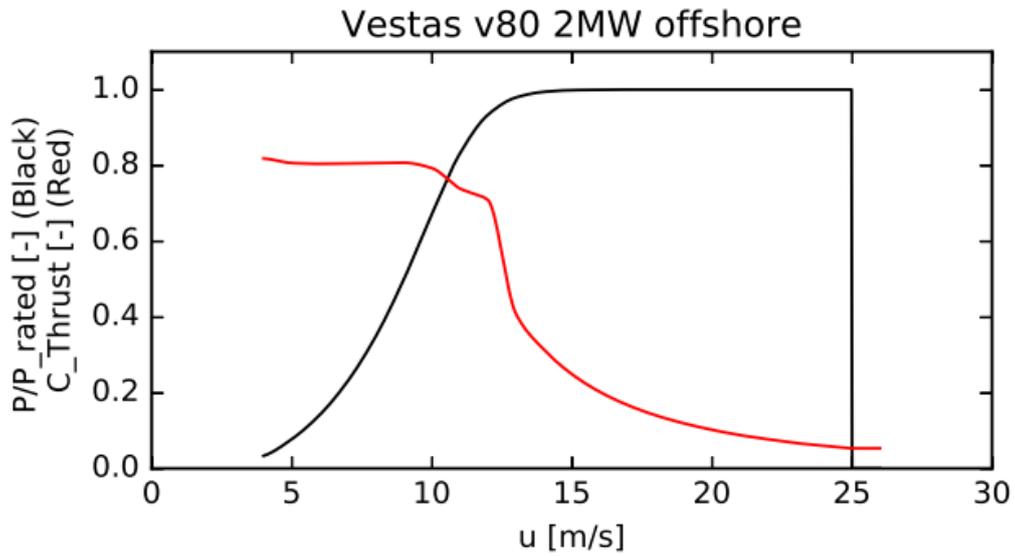


圖 38、Murcia 與 J. D. Sørensen 等人研究分析之離岸風場案例風場採用之 2MW 風機之性能曲線圖[37]

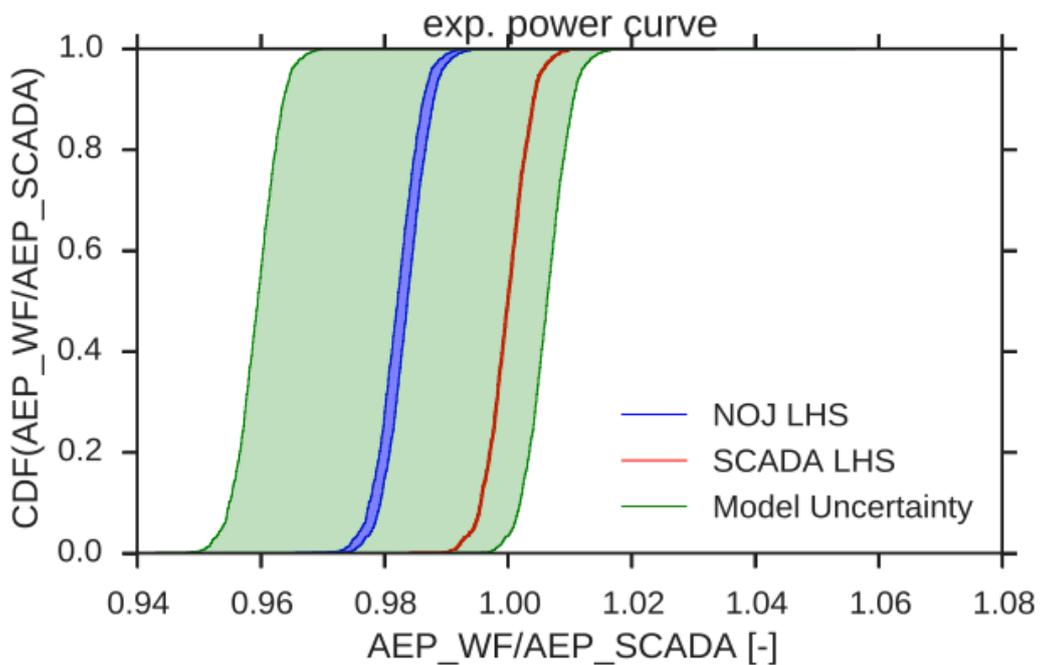


圖 39、Murcia 與 J. D. Sørensen 等人研究分析之離岸風場案例-實際的風機性能曲區與分析模型之不確定性比較圖[37]

分析結果的不確定性，與採用官方或是實驗之風機性能曲線有關。如果採用官方之性能曲線，則會因為風機模型的誤差導致無法判斷尾流模型之誤差大小，也導致整體分析的不確定性較大。反之如果採用實驗測得之性能曲線與實地校正過後之紊流強度進行分析的話，模型預測之偏差量與誤差則較小。結果亦顯示，此研究採用之 NOJ 模型能夠有效地掌握所分析風場之年發電量之標準差。且如果能夠將量測之不確定性納入考量的話，可進一步提高模型預測之準確率 (圖 39)。後續分析方向則建議由整體風場轉換至各別風機之性能、風速與風向對於年發電量之不確定性分析。

基於上述所學習到的知識，並呼應目前執行中的併網風場開發計畫，職實際進行一個所內併網風場規劃之案例分析。首先是微觀選址分析模型，此模型已將所內主要建物的效應納入考量當中，其建築物分布圖，如下圖 40 所示。

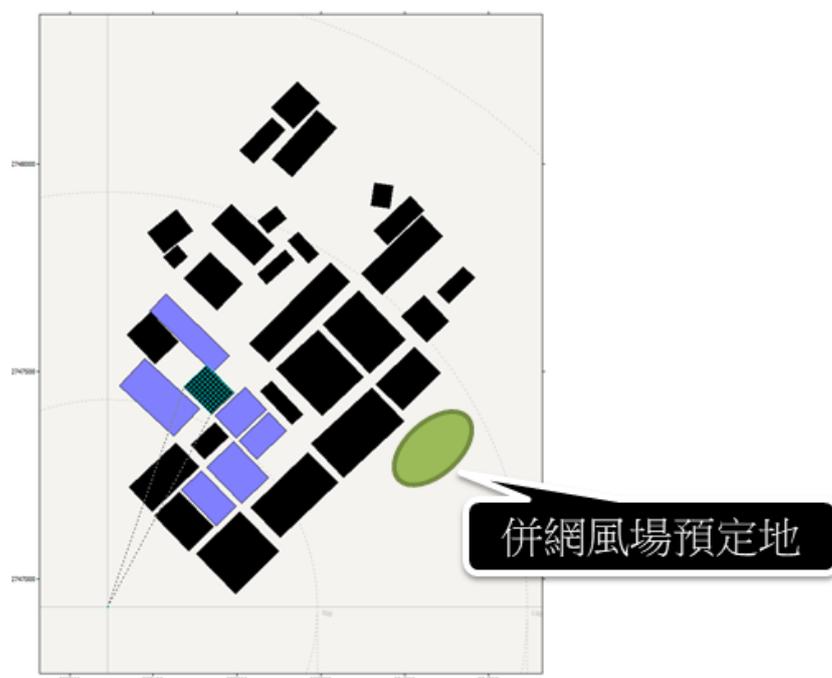


圖 40、微觀選址模型與併網風場預定地分布圖

而目前所內架設於 039 館頂樓之風向風速計所蒐集的風速風向歷時資料，經統計分析後，其結果如下圖 41 所示。

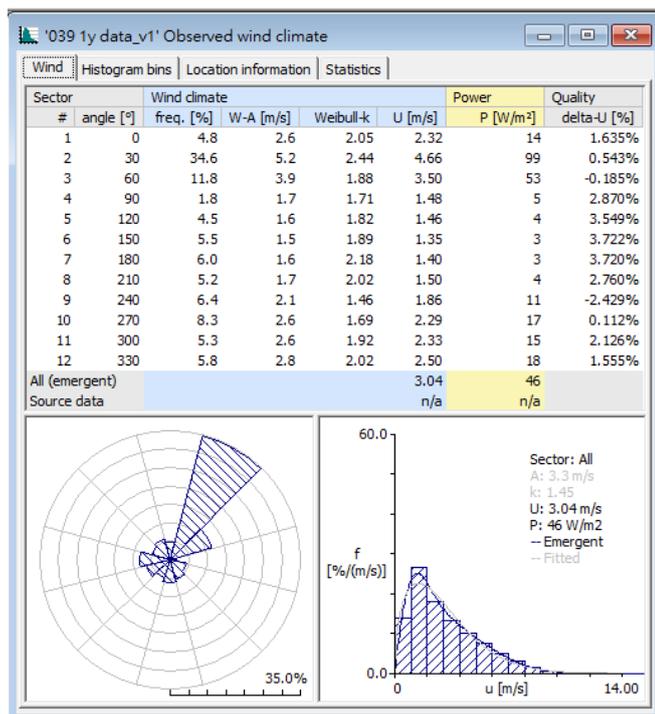


圖 41、統計分析之氣象資料

搭配之風機是採用 1 kW 之水平軸風機，其風機規格與性能曲線，如圖 42 所示。

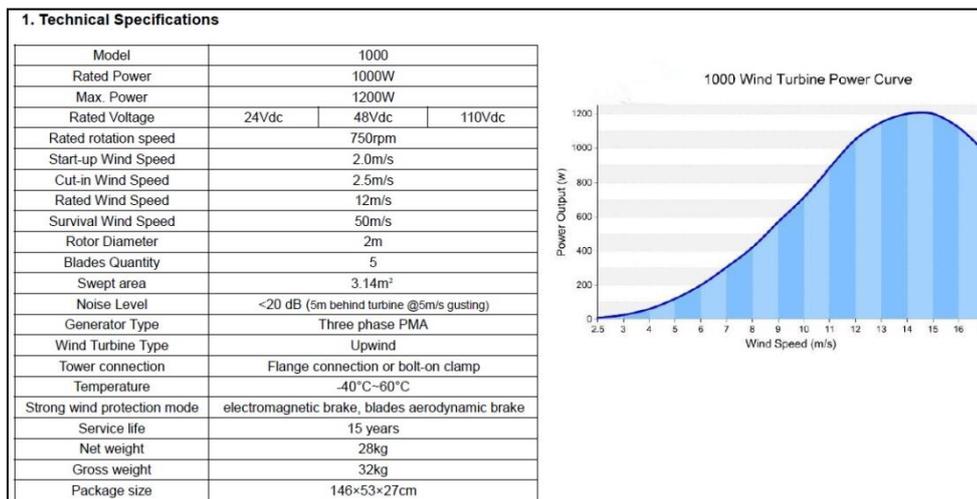


圖 42、1 kW 風機細部規格與性能曲線

經盤點所內適合架設風機的位置後，預定如圖 43 所示安裝 3 部 1 kW 之水平軸風機。



圖 43、風機位置示意圖

分析結果，如下表 8 所示。除了原本 039 館的資料外，靠近 048 館旁邊之風場預定地當中亦有架設一座測風站，因此將 2 組資料都進行分析與計算。039 館之測站資料完整性較高，約有 96%，而 048 館測站雖離風場較近，但資料有部份缺失，僅有 62%之資料，而採用 2 組不同風速資料計算之結果亦略有差異。總結本案例之分析結果，預估該併網風場之年發電量約在 600 kWh 左右。

表 8、併網風場案例分析結果

Weather data	AEP (kWh)	Ps.
Hall 048 (62% availability)	676	Within wind farm
Hall 059 (96% availability)	566	Higher data availability

本案例分析之規劃與結果，將提供目前執行中之併網風場開發計畫參考，作為後續正式建立併網風場之參考。另會將內容整理成報告與論文進行發表。

四、建議事項

此次至丹麥奧爾堡主要是學習風能評估及風能相關之工程技術，並進行交流。綜合此次公差的心得，建議如下。

- (一) 丹麥有豐富的自然資源，約有 50%的電力是來自風力發電，而從 2007 年至 2017 年期間，風力的發電總量從 7 GWh 提升至 14 GWh，另亦設立目標在 2020 年由離岸風電提供全國 40%之電力(我國為 2025 年 20%)，因此丹麥在發展離岸風機之經驗對於我國目前正積極發展之 2025 年 5.5 GW 之離岸風電目標將有重大助益，應持續與其進行交流，協助我國達成離岸風電之裝置目標。
- (二) 奧爾堡大學土木系在風機相關領域具有領先地位，包括可靠度分析與結構健康監測等項目，本所應持續與其交流，以加強本所與我國在風機領域之發展。

五、參考資料

1. Energinet.dk 2018 environmental report.
2. Matthew Huaquan Zhang *WIND RESOURCE ASSESSMENT AND MICRO-SITING*; Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, 2015.
3. Possner, A.; Caldeira, K. Geophysical potential for wind energy over the open oceans. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **2017**, *114*, 11338 LP – 11343.
4. P. S. Jackson J. C. R. Hunt Turbulent wind flow over a low hill. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **1975**, *101*, 929–955.
5. DTU Risoe Wind Atlas Analysis and Application Program Available online: <http://www.wasp.dk/>.
6. Ayala, M.; Maldonado, J.; Paccha, E.; Riba, C. Wind Power Resource Assessment in Complex Terrain: Villonaco Case-study Using Computational Fluid Dynamics Analysis. *Energy Procedia* **2017**, *107*, 41–48.
7. Toja-Silva, F.; Lopez-Garcia, O.; Peralta, C.; Navarro, J.; Cruz, I. An empirical–heuristic optimization of the building-roof geometry for urban wind energy exploitation on high-rise buildings. *Appl. Energy* **2016**, *164*, 769–794.
8. Adrian, G. Determination of the Basic State of a Numerical Mesoscale Model from Operational Numerical Weather Forecast. *Beitr. Phys. Atmosph.* **1987**, *60*, 3651–3670.
9. Dudhia, J. A Nonhydrostatic Version of the Penn State-NCAR Mesoscale Model: Validation Tests and Simulation of an Atlantic Cyclone and Cold Front. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **1993**, *121*, 1493–1511.
10. Pielke, R.A., Cotton, R.W., Walko, R.L., Tremback, C. J., Lyons, W.A., Grasso, D.L., Nicholls, M.E., Moran, M.D., Wesley, D.A., Lee, T.J., Copeland, J.H. A Comprehensive Meteorological Modelling System – RAMS. *Meteorol. Atmos. Phys.* **1992**, *49*, 69–91.
11. Betz, A. *Introduction to the Theory of Flow Machines (D.G. Randall, Trans.)*; Pergamon Press: Oxford, 1966.
12. IEC 61400-12-1 Wind Turbines – Part 12-1: Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines 2005.
13. Power Technology Horns Rev 3 Offshore Wind Farm.
14. Werle, M.J. *A New Analytical Model for Wind Turbine Wakes*; Wilbraham, USA., 2008.
15. Prospathopoulos, J.M., Politis, E.S., Chaviaropoulos, P.K. *Modelling Wind Turbine Wakes in Complex Terrain*; 2008.
16. *IEC 61400-1 (Ed.3) - Wind Turbine – Part 1: Design Requirements*; 2005.
17. Ragan, P., Manuel, L. Statistical Extrapolation Methods for Estimating Wind Turbine Extreme Loads. In Proceedings of the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition; Reno, Nevada, 2007.
18. Hwei, H. *Schaum's Outline of Probability, Random Variables, and Random Processes, 2nd edition*;

McGraw-Hill, 2010.

19. Jonsson, C. Statistical Analysis of Wind Data Regarding Long-Term Correction, Uppsala University, Sweden, 2010.
20. McDonald, B. A Teaching Note on Cook's Distance – A Guideline. *Res. Lett. Inf. Math. Sci.* **2002**, *3*, 127–128.
21. Cook, R.D., Weisberg, S. *Residuals and Influence in Regression*; Chapman & Hall: New York, 1982.
22. Anderson, M. *A Review of MCP Techniques. Report No. 01327R00022 (Issue 3)*; USA, 2004.
23. Derrick A. Development of the Measure–Correlate–Predict Strategy for Site Assessment. In Proceedings of the Proceedings of EWEC, 1993.
24. Rojas, R. *Neural Networks: A Systematic Introduction*; Springer: Berlin, 1996.
25. Zhang, J., Chowdhury, S., Messac, A., Castillo, L. A Hybrid Measure–Correlate–Predict Method for Wind Resource Assessment. In Proceedings of the ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability and 10th Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference; San Diego, CA, 2012.
26. Albrecht, C., Klesitz, M. Long Term Correlation of Wind Measurements Using Neural Networks. In Proceedings of the EWEC, 2007.
27. Harman, K. How Does the Real World Performance of Wind Turbines Compare with Sales Power Curves? In Proceedings of the EWEA 2012; Lyon, G.L. Garrad Hassan, 2012.
28. Madariaga, A., Martínez de Ilarduya, C.J., Ceballos, S., Martínez de Alegría, I., Martín, J.L. Electrical losses in multi-MW Wind Energy Conversion Systems. In Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality 2012; Santiago de Compostela, Spain, 2012.
29. Bell, S. *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*; UK, 2001.
30. Brower, M.C., Robinson, N.M., Hale, E. *Wind Flow Modelling Uncertainty, Quantification and Application to Monitoring Strategies and Project Design*; LCC, USA, 2010.
31. Brower, M.C. *Wind Resource Assessment, A Practical Guide to Developing a Wind Project*; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, New Jersey, 2012.
32. *BP Energy Outlook 2019*, 2019.
33. Möller, B.; Hong, L.; Lonsing, R.; Hvelplund, F. Evaluation of offshore wind resources by scale of development. *Energy* **2012**, *48*, 314–322.
34. Möller, B. Wind energy , landscape and ownership – geographical analysis of economy , resources and acceptance parameters. In Proceedings of the The 12th Biennial Conference of the International Association for the Study of Commons; Cheltenham, United Kingdom, 2008.
35. Kwon, P.S.; Østergaard, P. Assessment and evaluation of flexible demand in a Danish future energy scenario. *Appl. Energy* **2014**, *134*, 309–320.

36. Andersen, M.T. Floating Foundations for Offshore Wind Turbines, Aalborg Universitet, 2016.
37. Murcia, J.P.; Réthoré, P.-E.; Hansen, K.S.; Natarajan, A.; Sørensen, Dalsgaard, J. A new method to estimate the uncertainty of AEP of offshore wind power plants applied to Horns Rev 1. In Proceedings of the Scientific Proceedings. EWEA Annual Conference and Exhibition, 2015.

六、附 錄

附錄一 丹麥奧爾堡大學土木工程系 John Dalsgaard Sørensen 教授邀請函

Dr. Ming-Hong Chen
Assistant research fellow
Mechanical and System Engineering Program
Institute of Nuclear Energy Research
1000 Wenhua Rd. Jiaan Village, Longtan District Taoyuan City,
32546 Taiwan (ROC)



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Department of Civil Engineering
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg
Denmark

Professor
John Dalsgaard Sørensen
Phone: +45 9940 8581
E-mail: jds@civil.aau.dk

Date: 31-03-2019

Invitation for visit the 'Research Group Risk and Reliability' at Aalborg University

Dear Dr. Ming-Hong Chen,

You are hereby invited to visit the research group 'Risk and reliability' at Department of Civil Engineering, Aalborg University May 13 to May 24, 2019. The purpose of the visit is to discuss and strengthen the collaboration within reliability of offshore wind turbines, especially related to wind resources of Taiwan areas, souring of foundation structure for offshore wind power, and information of collections of offshore wind resources in Taiwan.

Best regards,

John D. Sørensen

John D Sørensen

Professor John Dalsgaard Sørensen
Department of Civil Engineering, room 1-320
Aalborg University
Thomas Manns Vej 23, 9200 Aalborg
Denmark
Tel: +45 9940 8581
Mob: +45 2077 5805



Research and Development progress of Wind energy in Taiwan

Dr. Ming-Hong Chen

Mechanical and System Engineering Program,
Institute of Nuclear Energy Research (INER)
Taiwan



May-2019



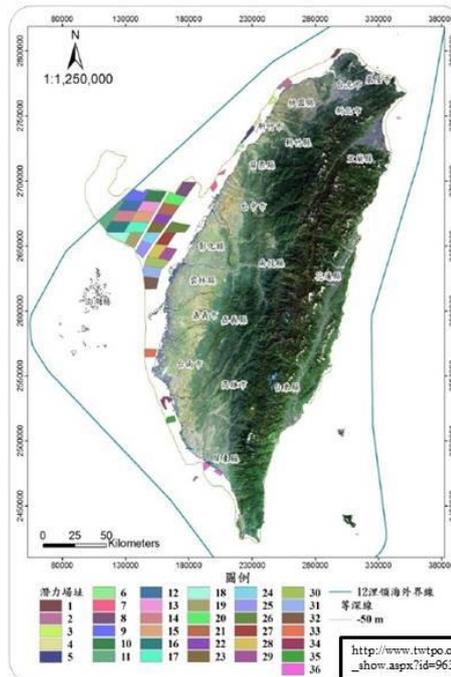
Outline

1. Offshore wind project in Taiwan
2. Institute of Nuclear Energy Research
3. Research Topics
 1. Wind Resources Assessment
 2. Micro-siting
 3. CFD and Lidar
 4. Scouring of Offshore wind turbine
4. Summary



Offshore wind farm in Taiwan

Rank	Project	Sea	Country	Status	Speed (m/s)
1	Fujian Putian City Flat Bay (Zone DE) - 600MW	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.12
1	Fujian Putian City Flat Bay Three (Zone C)	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.12
3	Shicheng Fishing Port	Xinghua Bay	Taiwan	Lightbulb	12.07
3	Fujian Putian City Flat Bay (Zone F) - 200 MW	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.07
5	Fujian Putian City Flat Bay - 50MW	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.05
5	Longyuan Putian Nanni Island 400MW Project - Phase 2 - 184MW	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.05
5	Longyuan Putian Nanni Island 400MW Project - Demonstration - 16 MW	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.05
5	Longyuan Putian Nanni Island 400MW Project - Phase 1 - 200MW	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.05
5	Fujian Putian City Flat Bay Two (Zone B)	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.05
5	W2N - EOLFI	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.05
11	Zone of Potential - 13 - Orsted	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.04
11	Zone of Potential - 15 - Orsted	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.04
11	Zone of Potential - 22	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.04
11	Zone of Potential - 9	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.04
11	Zone of Potential - 10	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.04
16	Zone of Potential - 8	Taiwan Strait	Taiwan	Lightbulb	12.02

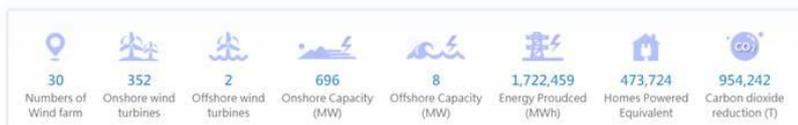


4C, offshore, 2018

http://www.twtpo.org.tw/offshore_show.aspx?id=963

3

Offshore wind project in Taiwan



Year	Installed capacity	Method	
2015~2020	520 MW	Demo + Potential	
2020~2025	5.5 GW (3GW early)	Demo + Potential	3 GW NTD 6/kWh
			2.5 GW Bidding
2025~	10~17 GW	Zonal development	

Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs



4



Offshore wind project in Taiwan



30.04.2019 17:44

- Final decision made by **Ørsted**
- Build 900 MW offshore wind farm from 2021 to 2022

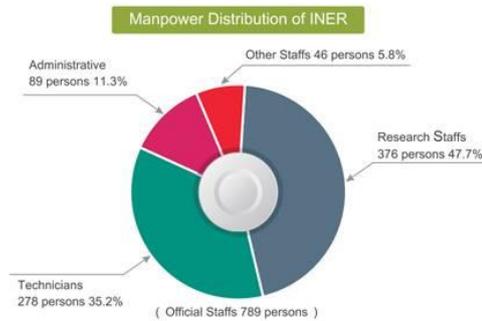


<https://orsted.tw/zh/News/2019/04/Changhua>

5



Institute of Nuclear Energy Research (INER)



2016 Annual Budget

unit: Thousand NTD

Item	Number of Accounts	Percentage
Administration and Safety	1,155,953	54.2%
Management, Operation and Maintenance	182,874	8.6%
R&D Projects	659,748	30.9%
Technology Promotion and Service	134,791	6.3%
Total	2,133,366	100.00%



https://www.iner.gov.tw/files/103_36.html

6

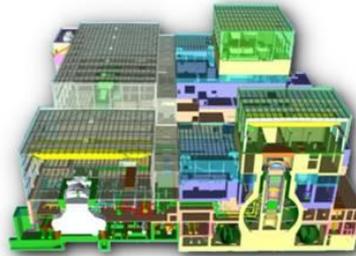


SWTDEL

SMALL WIND TURBINE DESIGN EVALUATION LAB

Institute of Nuclear Energy Research (INER)

- Nuclear Safety
- Radiation Application
- New Energy



<https://www.iner.gov.tw/article/>

7



SWTDEL

SMALL WIND TURBINE DESIGN EVALUATION LAB

INER-Wind Energy Road map

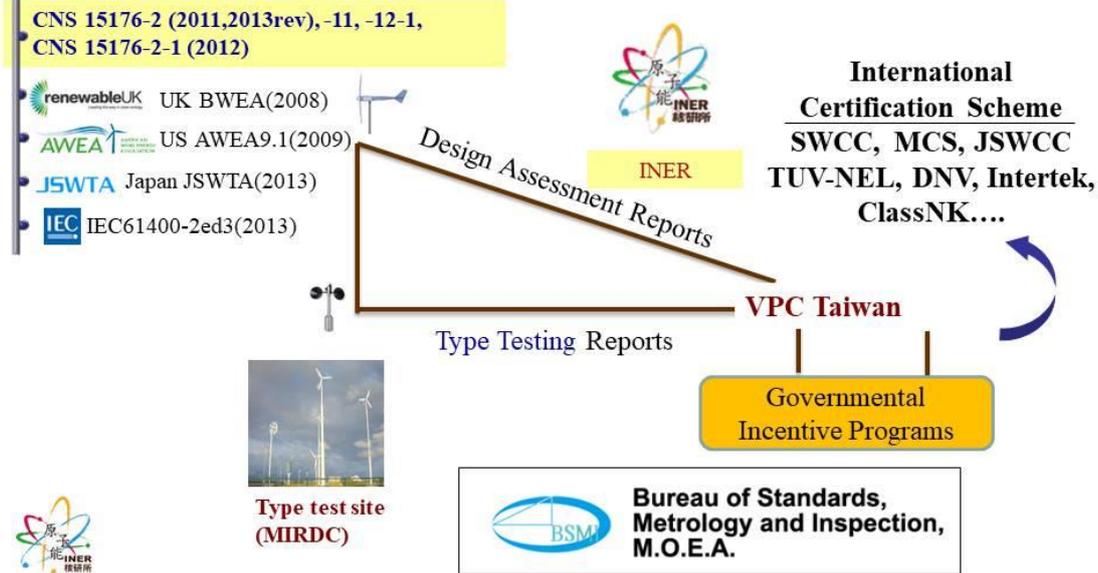
2005~2006	2007~2008	2009~2010	2011~2012	2013~
1 st 25 kW WT	2 nd 25 kW WT	400W WT	Improved 25 kW	Offshore WT
1 st 150 kW WT			2 nd 150 kW WT	



8

Design and verification Lab

- (Voluntary Product Certification, VPC)



9

Design and verification Lab

- DS3000: world first VAWT certificated by Japan

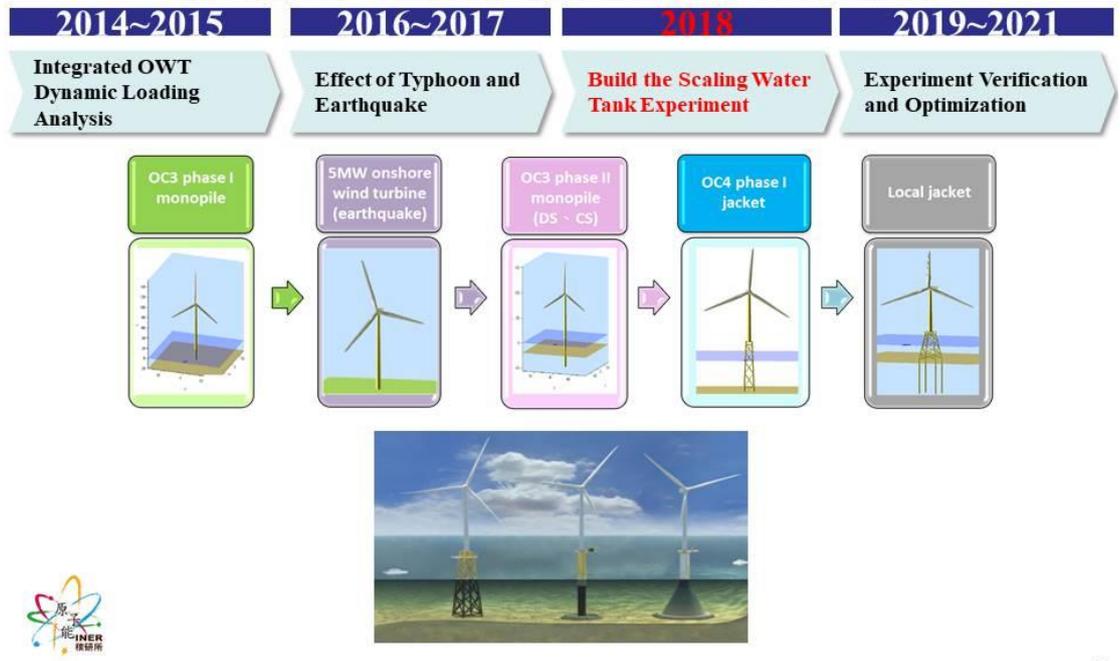


Wind farm in Central Taiwan-432 DS3000

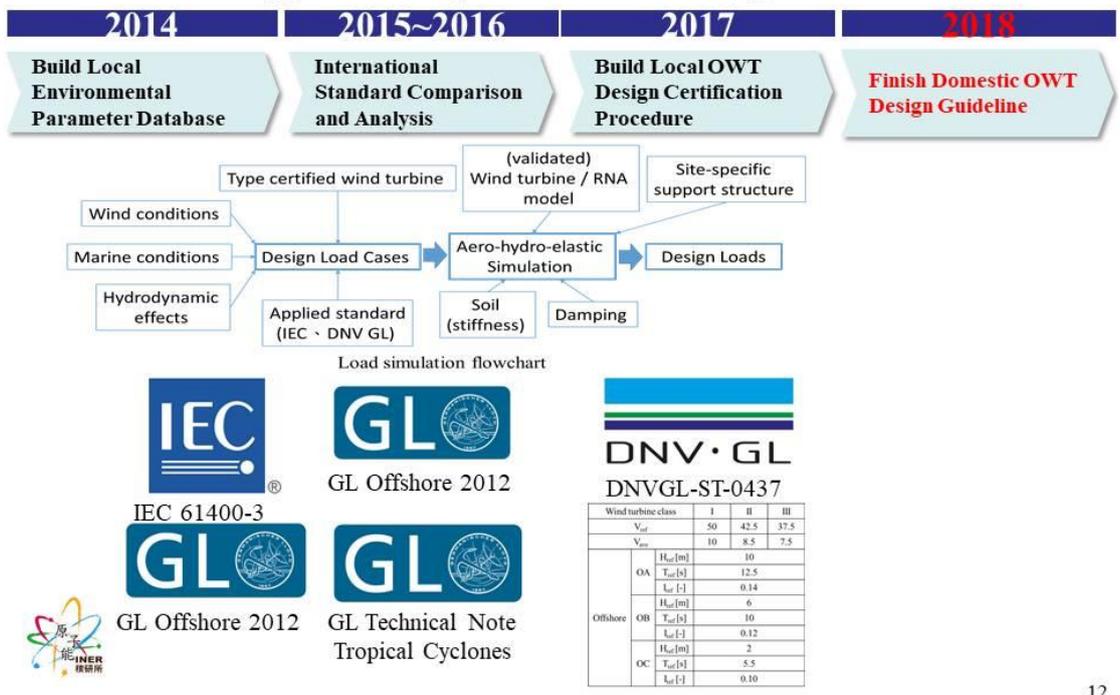


10

Offshore wind turbine for fixed-bottom underwater structures



Technology development for design certification



Technology development for design certification

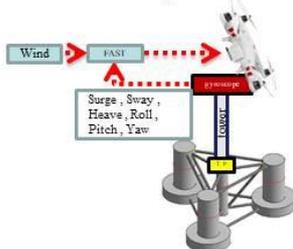
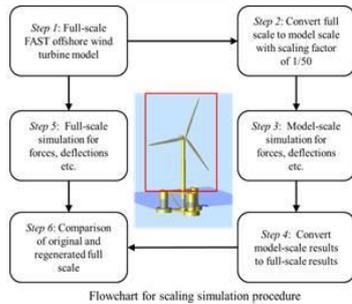
IEC 61400-3	Design situation
DLC 1.x	Power production
DLC 2.x	Power production plus occurrence of fault
DLC 3.x	Start up
DLC 4.x	Normal shut down
DLC 5.x	Emergency shut down
DLC 6.x	Parked (standing still or idling)
DLC 7.x	Parked and fault conditions
GL 2012	Design situation (for Earthquake)
DLC 9.7-9.9	Power production & Parked
GL Technical Note	Design situation (for tropical cyclone conditions)
DLC 11.1-11.3	Power production & Parked



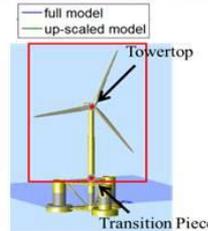
13

Technology development for floating OWT

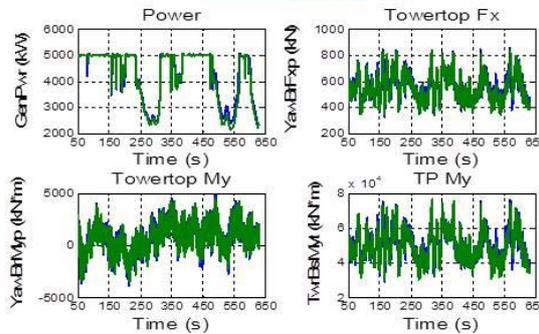
2014~2015
Offshore VAWT Preliminary Research



2018
Build the Scaling Water Tank Experiment

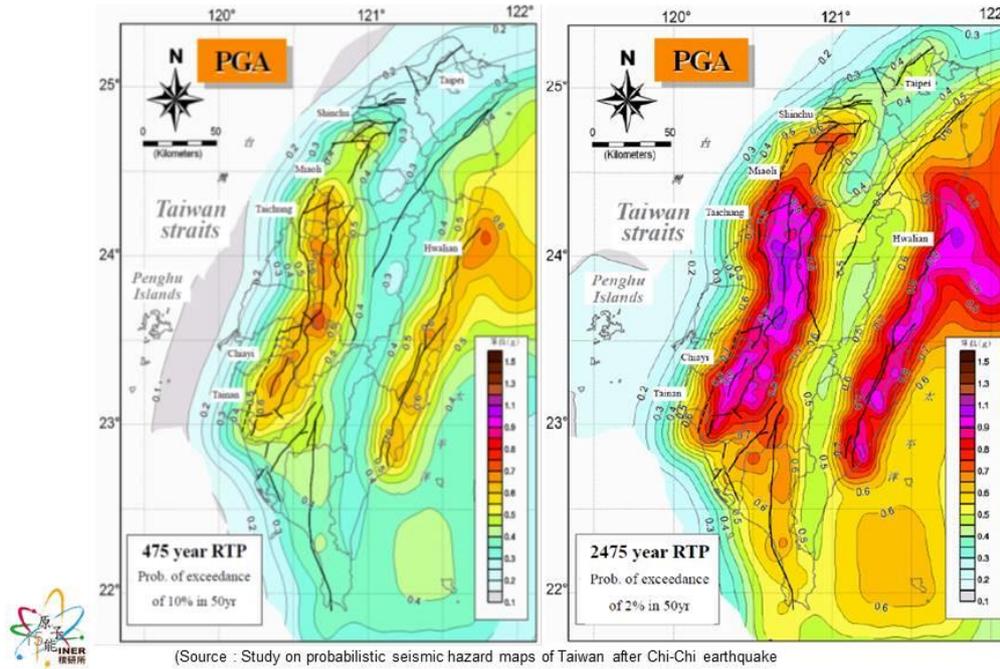


2019~2020
Scaling Water Tank Experiment and Model Verification



14

Taiwan Seismic Hazard Maps



15

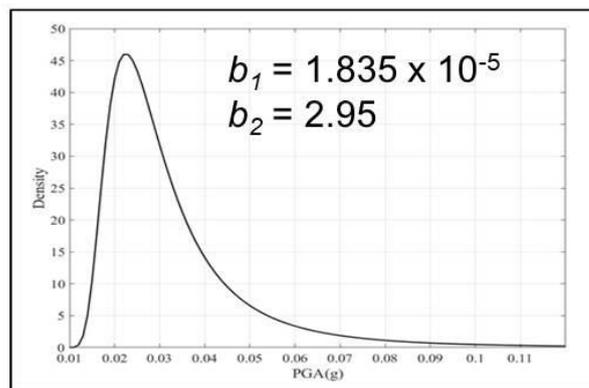
Taiwan Seismic Hazard Maps

- Frechet distribution

$$F_A(a) = \exp(-b_1 a^{-b_2}) ; a > 0$$

$$T_a \cong \frac{1}{b_1} a^{b_2}$$

PGA (a)	RTP (T)
0.2g	475 years
0.35g	2475 years



16

Reliability Analysis

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} P_F(a) \cdot f_A(a) da$$

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f)$$

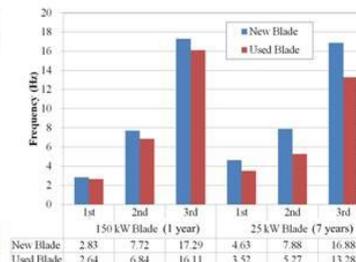
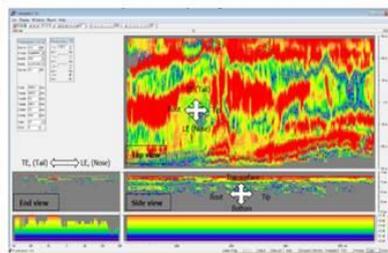
Damage State	Damping ratio	Damage probability	Reliability Index
DS ₁	2%	9.55x10 ⁻⁰⁴	3.1
DS ₄		8.70 x10 ⁻⁰⁵	3.75
DS ₁	5%	2.34 x10 ⁻⁰⁴	3.5
DS ₄		2.17 x10 ⁻⁰⁵	4.09

- IEC 61400-1 reliability index target is 3.3



Operation and maintenance

- Blade NDT

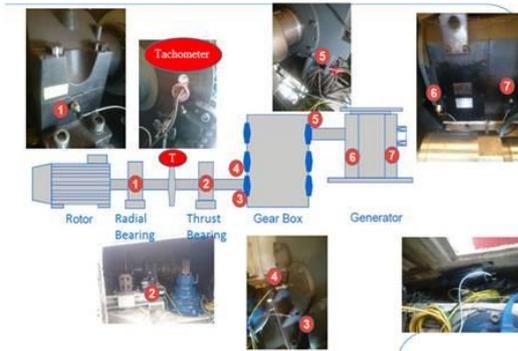


Infrared

Ultrasonic

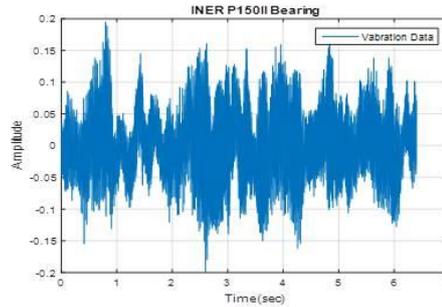
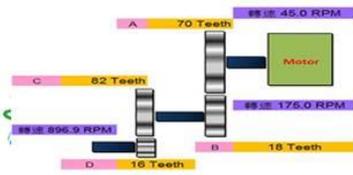
Hammer test

Operation and maintenance



- Real time monitor and fault diagnostic system

軸字號	轉速	RPM	齒數	齒比	齒比
S1	Speed	45	Teeth(齒數)	70	齒比
S2	175.00	A	18	A&B	3.150 CPM
S3	2.92	B	82	C&D	82.500 Hz
	896.88	C	18		14.350 CPM
	14.95	D	18		239.167 Hz
					319.89 82.00 18.00
					0.00 0.00 0.00
					MA Ratio
					S1 1.000
					S2 3.889
					S3 19.931



19

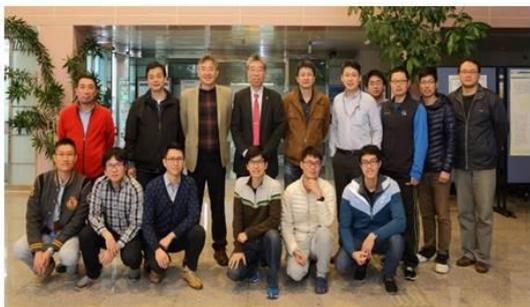
International communication (1/3)

- IEA Task 27 in Taiwan (2016)



20

International communication (2/3)



ISHIHARA Takeshi of Tokyo University for typhoon



ClassNK, Japan for load measurement



International communication (3/3)



Prof. J. D. Sørensen of AAU for reliability of OWT



Prof. Po Wen Cheng of Leiter Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE) for design and verification and floating OWT



Universität Stuttgart
Institut für Flugzeugbau





Research Topics



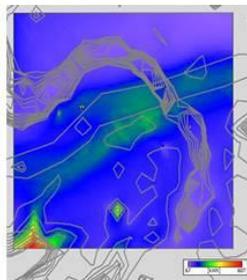
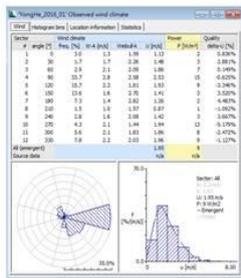
WRA (Wind resources assessment)



22F, 477 kWh

4F, 132 kWh

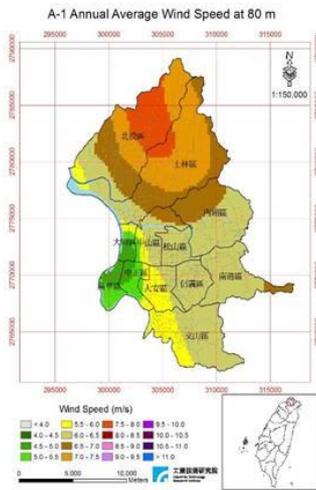
**DS 3000
(3 kW)**



**Supervising Agency
Atomic Energy Council**



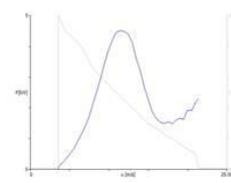
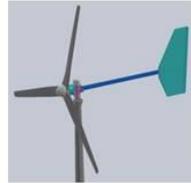
WRA (Wind resources assessment)



Dream Lake



Mt. Xiangtian

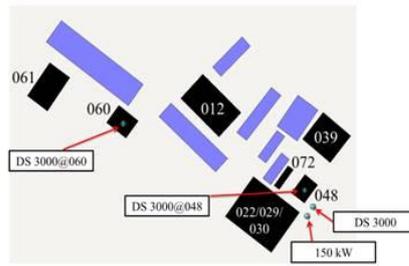


KE 4800 (VPC)



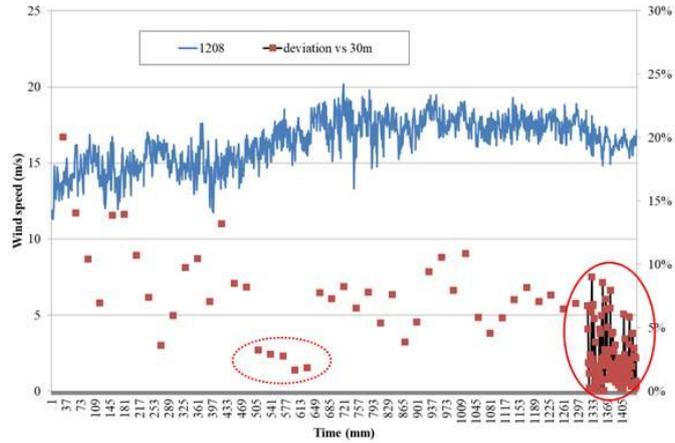
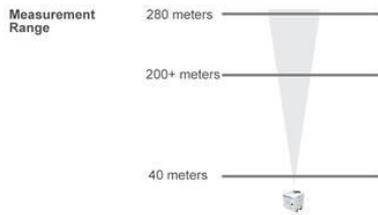
AEP ~ 8000~9000 kWh

Micro-siting, in INER



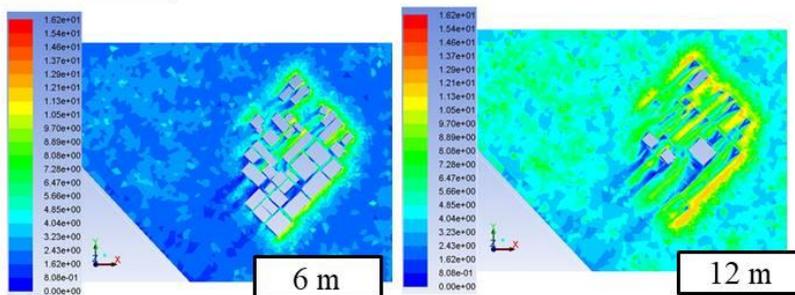
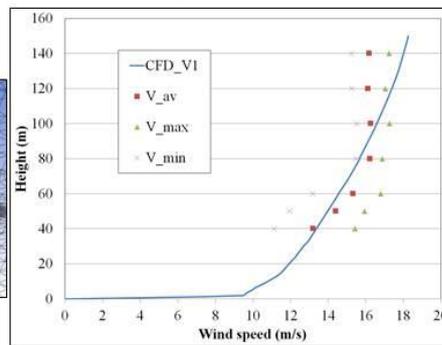
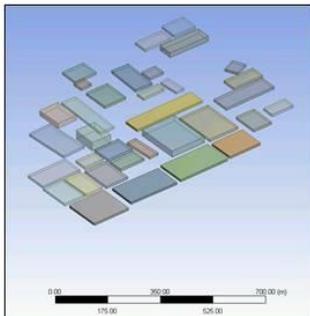
Cases	Height (m)	V_{mean} (m/s)	AEP (MWh)	Increment
150 kW	50	3.45	50	—
DS3000	6.08	1.16	0.137	—
DS3000@048	16	1.85	0.324	2.36
DS3000@060	41	3.15	1.378	10.06
KE4800	13	1.74	0.818	—
KE4800@048	23	2.51	1.651	2.02
KE4800@060	48	3.35	3.328	4.07

CFD model and Lidar data



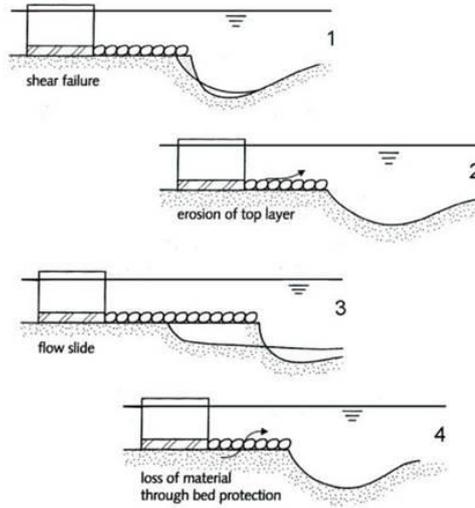
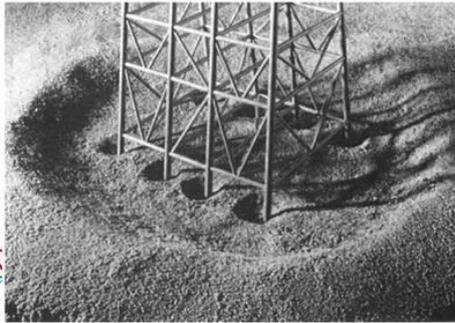
27

CFD model and Lidar data



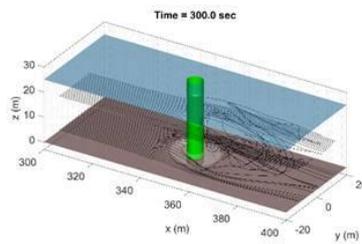
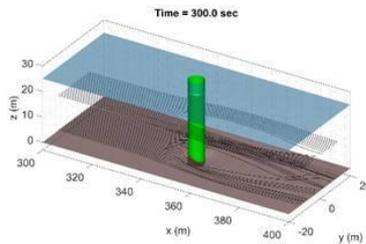
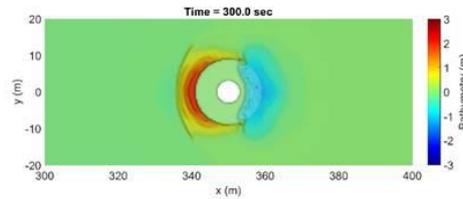
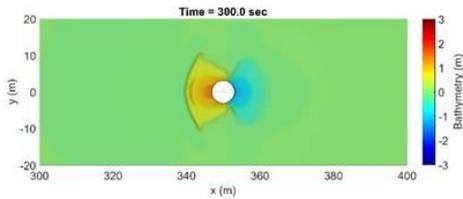
28

Scour and failure mode



Zaaijer, M. B., and J. Van der Tempel. "Scour protection: a necessity or a waste of money." *Proceedings of the 43 IEA Topical Expert Meeting*, 2004

Results and discussion-Monopile

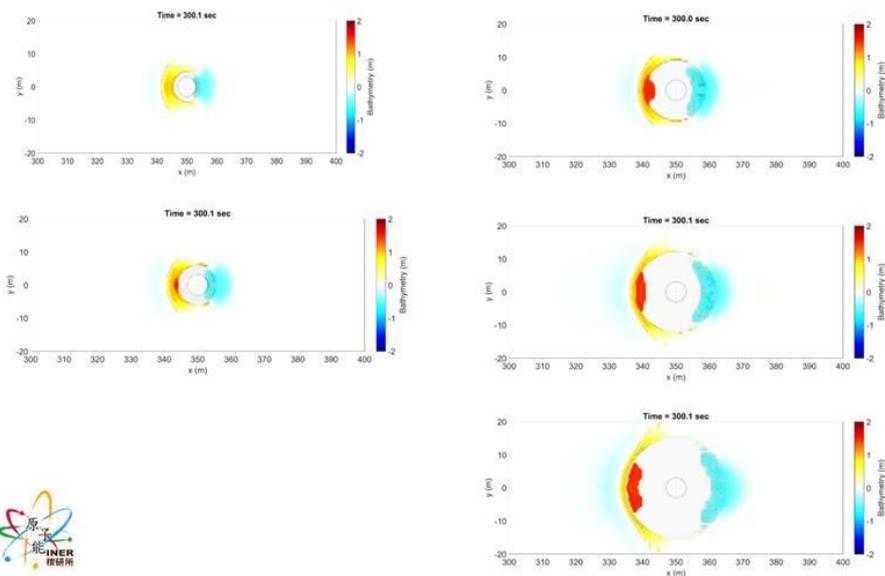


With Protection



Radius of protection structure

Protection, $h=1$ m, R (m) = 4.5, 6.0, 9.0, 12.0, 15.0

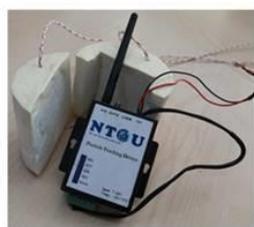


31

Scouring Experimental method



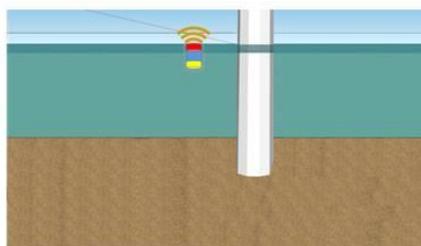
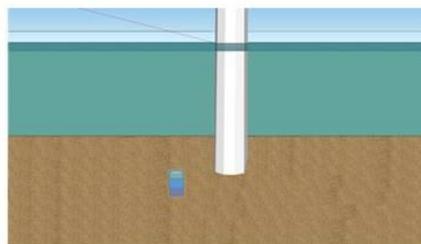
Warming buoy system



Main system



GPS system



Tzu Chi University

Tzu Chi University, Prof. Jiang, Taiwan, 2019

32



Summary

- **OWT project and progress in Taiwan**
 - 5.5 GW by 2025, now 8 MW
 - Final decision made by Ørsted to build 900 MW offshore wind farm from 2021 to 2022 (April-30/2019)
- **R & D of INER**
 - Small to mid-scale wind turbine
 - Design and Verification Lab
 - Offshore wind turbine techniques
 - Operational and maintenance
- **International corporations**
 - IEA, Japan, Denmark (AAU) and Germany (SWE)
- **Research topics**
 - WRA, micro-siting, CFD, Lidar, Scouring



33



Thank you for your
attention



34

附錄三 討論會議安排通知

2019/5/20

Workshop 'Offshore

回覆 全部回覆 轉寄

Workshop 'Offshore

John Dalsgaard Sørensen [jds@civil.aau.dk]

至: Amol Mankar [ama@civil.aau.dk]; 'Gianluca Zorzi' [zorzi@gudconsult.de]; Sima Rastayesh [sir@civil.aau.dk]; Yi Yang [yy@civil.aau.dk]; René Meklenborg Miltersen Slot [rmms@civil.aau.dk]; Dawid Augustyn [DAWA@ramboll.com]; Lars Bo Ibsen [lbi@civil.aau.dk]; Christian Frier [cf@civil.aau.dk];
副本: Lene Faber Ussing [lfu@civil.aau.dk]

2019年5月16日 下午 01:27

Dear all,

Hereby an invitation to participate in a workshop 'Offshore wind turbine design – with focus on reliability aspects'
Monday May 20, 2019 at 12:30.

The workshop takes place in room 1.252.

Program:

Ming-Hong Chen, INER, Taiwan: Status of offshore wind in Taiwan, recent research on offshore wind resource, scouring of offshore wind foundation

John D Sørensen. Probabilistic design of wind turbines

Jannie S Nielsen: Operation & maintenance of offshore wind turbines

Thomas L Andersen: Wave loads on offshore wind turbines

Amol Mankar: Reliability based design of concrete offshore wind turbine substructures

Gianluca Zorzi: Geotechnical aspects of design of offshore wind turbines

Best regards,
John

Professor John Dalsgaard Sørensen
Department of Civil Engineering, room 1-320
Aalborg University
Thomas Manns Vej 23, 9200 Aalborg
Denmark
Tel: +45 9940 8581
Mob: +45 2077 5805

<https://excweb.iner.gov.tw/owa/?ae=Item&a=Open&t=IPM.Note&id=RgAAAAA5gUlaOVN0TJHrLw3DITM%2bBwAD7ieJWM1bTL5CbS8MUioAB...> 1/1